Agosto 1992
Numero 288
Anno XXV
Volume XLVIII

I primi risultati di Hubble

Pur menomato da difetti ottici e meccanici, lo Hubble Space Telescope ha fornito in due anni di attività immagini di fenomeni mai osservati il cui studio potrebbe portare a una revisione della moderna astronomia

di Eric J. Chaisson

Il 25 aprile 1990 lo Hubble Space Telescope è uscito dalla stiva della navetta spaziale *Discovery* e si è posto in orbita, segnando l'inizio di una nuova era dell'astronomia ottica. I telescopi ottici a terra, dai primi cannocchiali di Galileo al modernissimo telescopio Keck, sono da sempre ostacolati dalle distorsioni dovute all'atmosfera. Hubble invece è stato progettato per osservare il cielo da una posizione privilegiata, a 610 chilometri d'altezza, con una chiarezza senza precedenti.

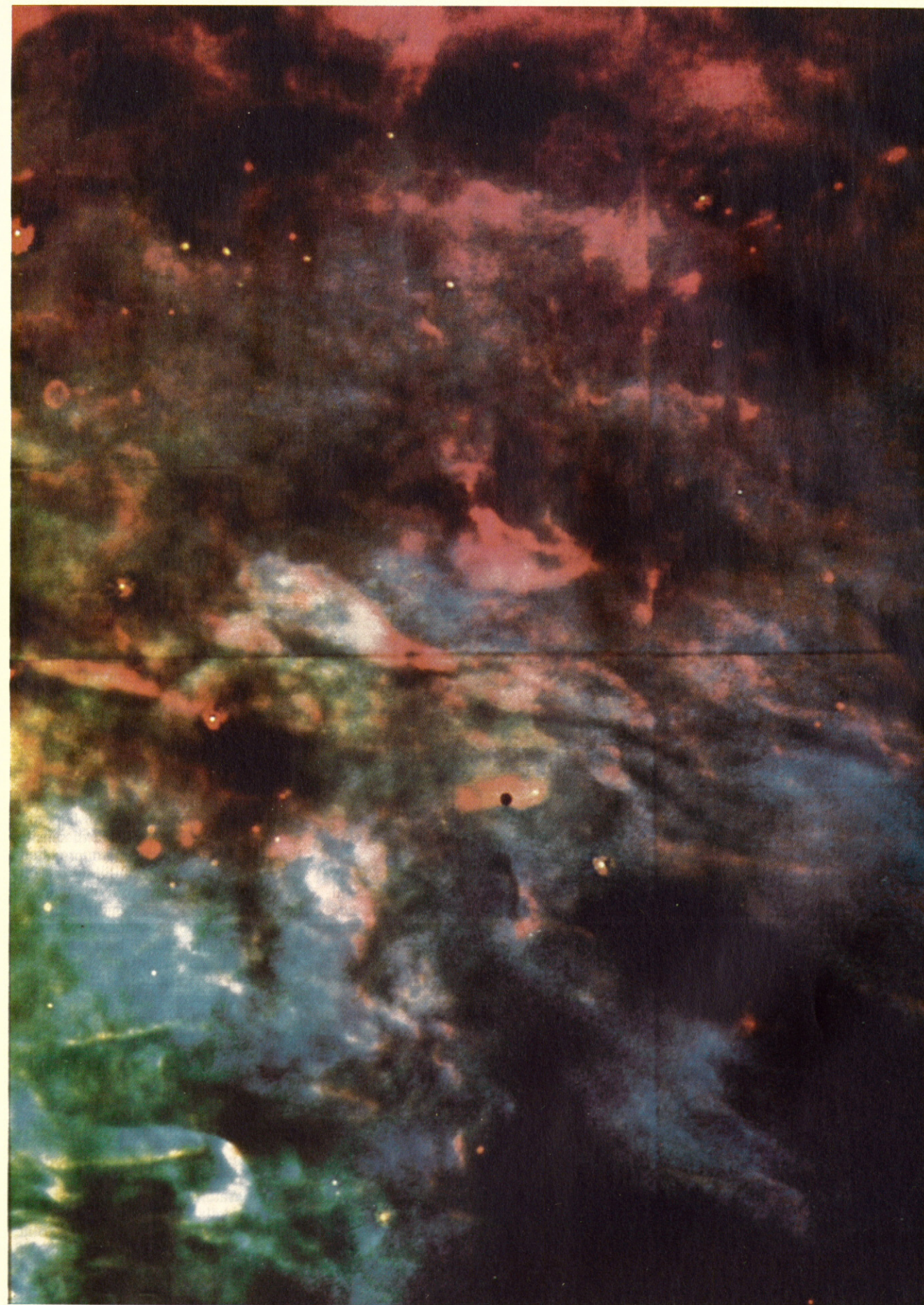
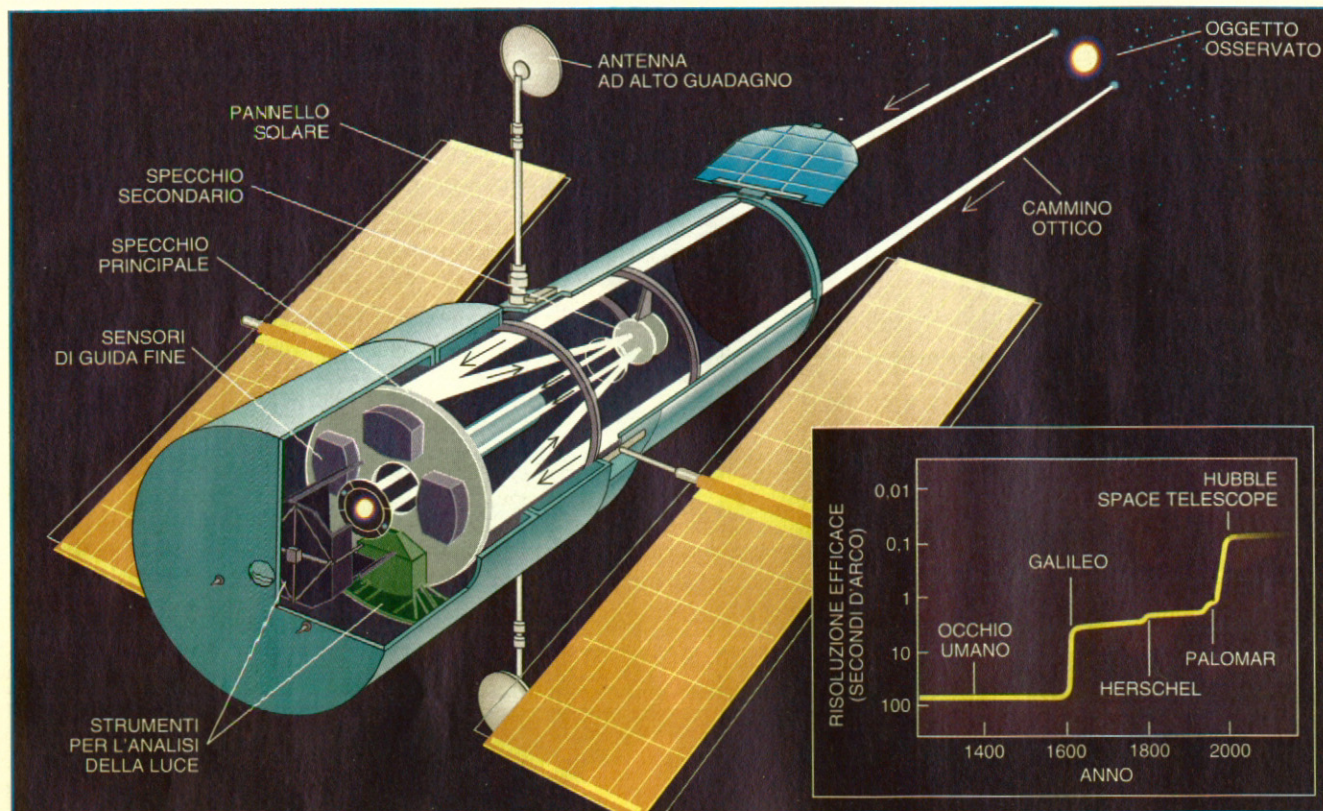
Come ormai tutti sanno, il telescopio non funziona come previsto. Diversi inconvenienti meccanici e di progettazione, tra i quali soprattutto un errore di sagomatura dello specchio principale, degradano le prestazioni dello strumento. Queste difficoltà hanno contrariato molti astronomi e suscitato commenti critici da parte dei mezzi di comunicazione; grazie a modifiche improvvisate delle procedure e a tecniche innovative per la correzione delle immagini, Hubble è però oggi in grado di uguagliare la sensibilità dei migliori telescopi a terra e di superarne il potere risolutivo. Inoltre è capace di rilevare la radiazione ultravioletta (di lunghezza d'onda leggermente inferiore a quella della luce visibile), che viene assorbita dall'atmosfera terrestre.

Nei primi due anni di funzionamento il telescopio spaziale ha inviato a terra immagini magnifiche delle tempeste di Saturno, della nascita e della morte delle stelle e di certi oggetti enigmatici, forse buchi neri giganti, acquattati nel centro delle galassie. Presa a sé, nessuna delle scoperte di Hubble merita l'appellativo di rivoluzionaria, ma nel complesso esse potrebbero ben presto costringere gli astronomi a riscrivere i propri manuali.

Lo Hubble Space Telescope, con i suoi 11 500 chilogrammi (circa 10 volte il peso di un'automobile di media cilindrata), è l'osservatorio scientifico più complesso e sensibile mai inviato nello spazio (si veda l'articolo *Lo Space Telescope* di John N. Bahcall e Lyman Spitzer, Jr., in «Le Scienze» n. 169, settembre 1982). Il suo specchio principale da 2,4 metri di diametro è il più levigato e pulito fra quelli esistenti; un sistema di guida estremamente perfezionato mantiene il telescopio fissato sul bersaglio, nonostante Hubble sfrecci intorno alla Terra percorrendo un'orbita ogni 96 minuti. La luce raccolta viene poi analizzata da cinque strumenti diversi.

La Faint Object Camera ha una sensibilità e una risoluzione eccezionali, mentre la Wide Field and Planetary Camera garantisce una apertura di campo più ampia. Analogamente, vi sono due spettrografi che si dividono il compito di scomporre la luce nelle lunghezze d'onda costituenti per rivelare la struttura fisica e la dinamica degli oggetti osservati: il Faint Object Spectrograph e il Goddard High-Resolution Spectrograph. Un fotometro misura l'esatta luminosità delle varie sorgenti. Inoltre i sensori di guida di Hubble permettono di effettuare misurazioni astrometriche, cioè determinazioni di alta precisione della posizione angolare delle stelle sulla sfera celeste.

Subito dopo il lancio di Hubble gli operatori del Goddard Space Flight Center della National Aeronautics and Space Administration cominciarono una lunga serie di controlli e calibrazioni del sistema. Le prime immagini di prova rivela-

La nebulosa di Orione dimostra le capacità dello Hubble Space Telescope. L'area (*riquadro*) ripresa da Hubble (*a destra*) mostra strutture e filamenti mai osservati prima. La formazione a getto a sinistra sembra essere materia espulsa da una stella neonata. L'immagine composita è stata ottenuta combinando la luce blu dell'ossigeno ionizzato, quella rossa dello zolfo ionizzato e quella verde dell'idrogeno neutro.

Hubble è basato su un progetto fondamentalmente uguale a quello dei moderni telescopi riflettori con base a terra. Lo specchio principale di 2,4 metri di diametro raccoglie la luce, che viene poi distribuita a cinque strumenti analitici. Il problema di messa a fuoco del telescopio deriva dal fatto che lo specchio ha una curvatura sbagliata. Hubble comunque supera la risoluzione dei telescopi a terra quasi quanto il telescopio di Galileo superava quella dell'occhio nudo (*nel riquadro*).

rono un problema intrinseco di messa a fuoco, che in termini tecnici si chiama «aberrazione sferica». Un esame attento delle immagini dimostrò che lo specchio principale del telescopio era stato molato dandogli una forma sbagliata: risulta due micrometri più piatto ai bordi di quanto non prevedesse il progetto. Per quanto piccolo possa sembrare, un errore di questa entità è grossolano secondo i criteri dell'ottica di precisione attuale.

La forma dello specchio rende quindi impossibile la messa a fuoco in un punto solo di tutta la luce raccolta da Hubble. I progettisti miravano a far sì che il telescopio concentrasse il 70 per cento della luce di una sorgente puntiforme, per esempio una stella lontana, in una macchiolina del diametro di 0,1 secondi d'arco (un secondo d'arco è un angolo molto piccolo, pari a 1/1800 appena del diametro apparente della Luna); invece solo il 15 per cento della luce cade in questa zona centrale, mentre il restante 85 per cento si allarga in un alone indesiderato avente un diametro di parecchi secondi d'arco.

Sono poi emerse diverse altre difficoltà. Due volte per ogni orbita, quando Hubble entra ed esce dall'ombra della Terra, la variazione improvvisa di temperatura fa oscillare in su e in giù i grandi pannelli solari del telescopio di circa 30 centimetri ogni 10 secondi. Lo scuotimento che ne risulta è sufficiente per perturbare il sistema di puntamento e rendere le immagini ancora più confuse. Inoltre due dei sei giroscopi si sono guastati e un terzo funziona solo a intermittenza; al telescopio ne occorrono almeno tre per svolgere le normali attività scientifiche. Inconvenienti ad alcuni contatti elettrici, infine, minacciano di bloccare lo High-Resolution Spectrograph.

La NASA spera di poter risolvere alcuni di questi problemi nel 1994, anno nel quale è prevista una visita a Hubble da parte di astronauti che cercheranno di sostituire i pannelli solari e due dei giroscopi. Gli astronauti tenteranno anche di installare un sistema di ottiche correttive e una versione perfezionata della Wide Field and Planetary Camera, se i due nuovi dispositivi saranno pronti.

Nel frattempo gli scienziati hanno escogitato vari stratagemmi per ottenere dal telescopio spaziale le migliori prestazioni possibili allo stato attuale. Dato che lo specchio di Hubble è stato lavorato con grande precisione e che l'errore è noto, la correzione al calcolatore riesce a ricondurre molte immagini alla nitidezza prevista. Le immagini astronomiche risultanti hanno confutato in maniera eloquente un certo pessimismo iniziale sulle capacità scientifiche del telescopio. Purtroppo per ottenere questa risoluzione occorre spesso eliminare gli aloni sfumati che appaiono intorno agli oggetti celesti, buttando via, letteralmente, la maggior parte della luce che Hubble riesce a captare.

Il colpo più duro alla missione scientifica di Hubble non è quindi la perdita di risoluzione, ma la perdita di sensibilità. Lo strumento era stato progettato per rivelare oggetti un miliardo di volte più deboli di quelli visibili a occhio nudo, ma oggi non riesce a individuare oggetti che non abbiano luminosità almeno 20 volte superiore a quella prevista. Non è quindi in grado di rivelare alcuni oggetti particolarmente difficili da cogliere, come galassie e quasar estremamente lontani o eventuali pianeti di altre stelle. È stato perciò necessario rinviare molte delle osservazioni potenzialmente più significative, in attesa delle riparazioni.

Pur essendo stato progettato per osservare alcuni dei corpi celesti più lontani, Hubble si è dimostrato molto adatto allo studio degli oggetti interni al sistema solare; per esempio ha realizzato immagini straordinarie dei pianeti giganti, Giove e Saturno. Le due sonde spaziali Voyager della NASA hanno esaminato da vicino Giove nel 1979 e Saturno nel 1980 e nel 1981; oggi il telescopio spaziale è in grado di produrre continuamente immagini dei due pianeti con una ricchezza di particolari paragonabile a quella ottenuta dalle sonde nei giorni immediatamente precedenti il massimo avvicinamento.

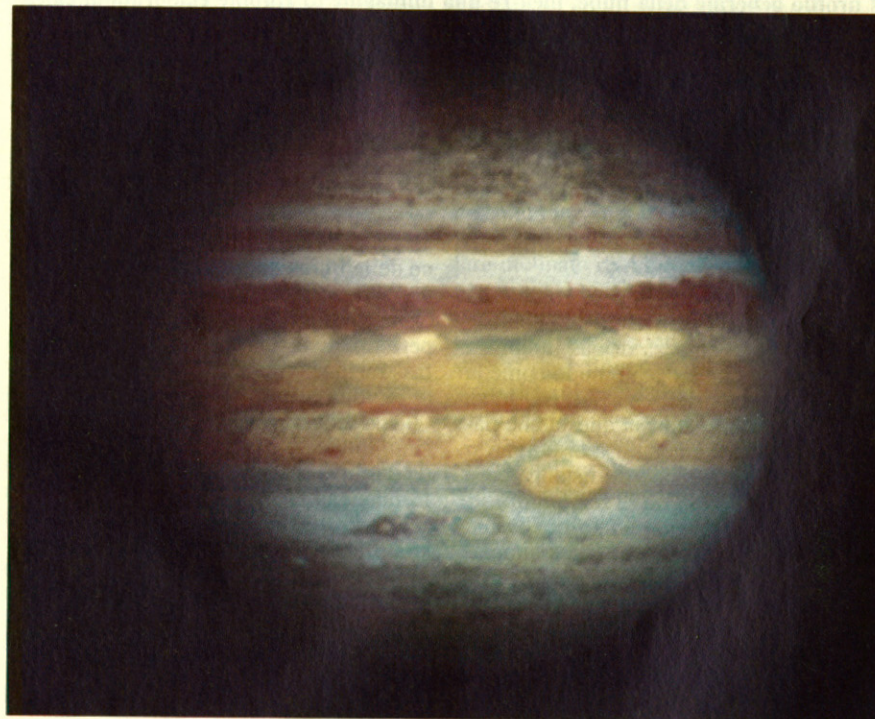
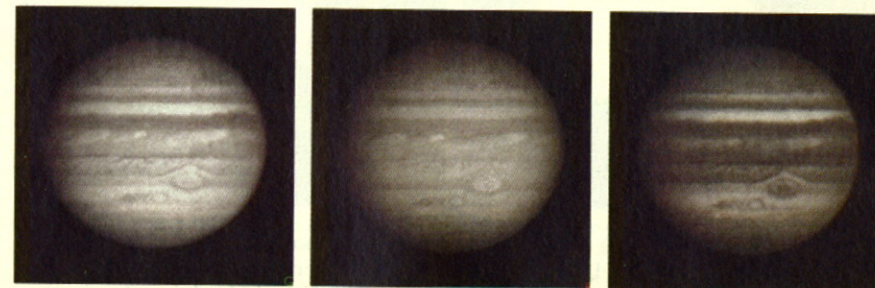
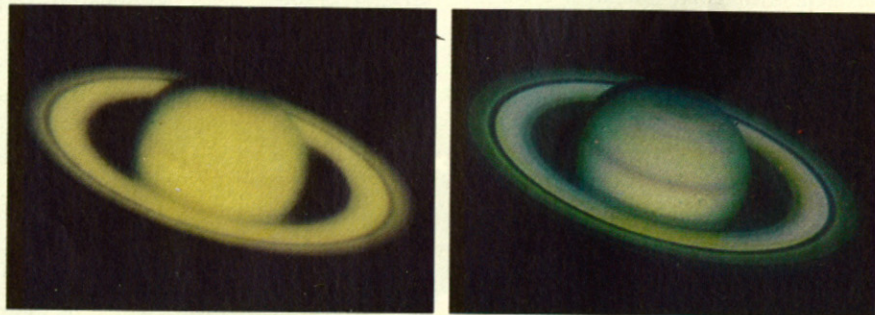
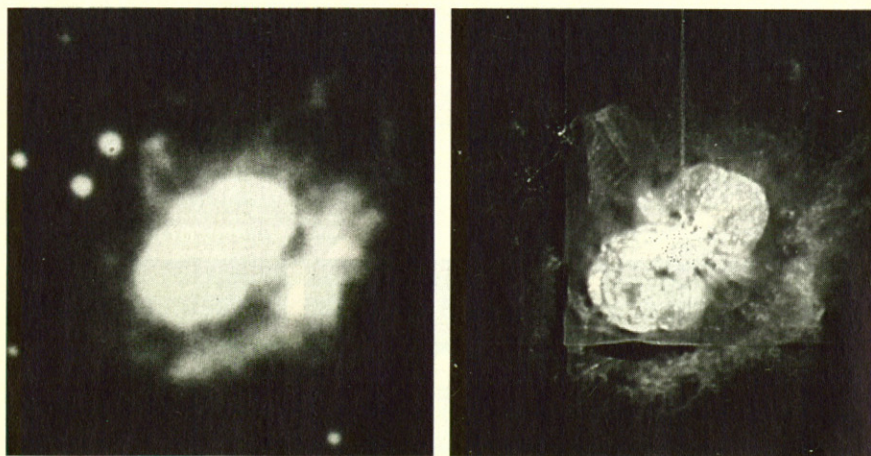
Esaminando Giove, Hubble ha trovato un pianeta notevolmente cambiato rispetto a quello visitato da *Voyager 1* e *2*. Bande di nubi si sono formate e dissolte, sono comparse molte macchie (tempeste simili a cicloni, con un diametro anche di migliaia di chilometri) e, sul bordo della grande fascia equatoriale meridionale del pianeta, è comparsa una struttura turbolenta. La famosa grande macchia rossa, un uragano apparentemente perpetuo con un diametro doppio di quello della Terra, ha assunto un colore pallido, fra l'arancione e il bruno.

Le prime immagini di Saturno raccolte da Hubble illustrano nella maniera più efficace il potere risolutivo del telescopio spaziale. William A. Baum del Lowell Observatory e Shawn P. Ewald dello Space Telescope Science Institute hanno composto un'immagine a colori del pianeta partendo da tre immagini con esposizione di un secondo, una in luce rossa, una in luce verde e una in luce blu. Gli esperti dell'Astronomy Visualization Laboratory dell'istituto hanno preparato poi un'immagine a colori corretta al calcolatore che evidenzia nei particolari la struttura delle bande di nubi e degli anelli. L'immagine comprende anche i primi scorci ad alta risoluzione della regione polare boreale del pianeta.

Nell'autunno 1990 Hubble ha realizzato oltre 100 immagini di Saturno per seguire l'evoluzione di una tempesta della larghezza di 50 000 chilometri costituita da cristalli di ghiaccio di ammoniaca e detta «grande macchia bianca». Queste osservazioni sono tanto più preziose in quanto questa macchia compare solo ogni 60 anni circa.

Il vantaggio specifico di Hubble nel campo dell'astronomia planetaria è la sua capacità di fornire in qualunque momento immagini paragonabili per chiarezza a quelle delle sonde spaziali. Philip B. James dell'Università di Toledo, insieme con alcuni colleghi, osserverà l'atmosfera di Marte in un periodo di diversi anni per studiarne l'evoluzione meteorologica e cercare di capire quali eventi scatenino le tempeste di polvere che di tanto in tanto interessano l'intero pianeta. Queste ricerche rappresentano un prerequisito importante per qualunque spedizione con equipaggio umano verso il pianeta rosso. James A. Westphal del California Institute of Technology ha in programma studi analoghi dei titanici sistemi meteorologici di Giove.

Hubble ha rivolto il proprio sguardo anche verso il minuscolo Plutone, che orbita nelle regioni più lontane e buie del sistema solare a quasi 5 miliardi di chilometri dal Sole. Plutone e il suo grande satellite Caronte orbitano a una distanza reciproca di appena 19 000 chilometri e quindi, visti dalla Terra, si confondono in un'unica macchia bitorzoluta. La Faint Object Camera ha fornito per la prima volta immagini in cui i due oggetti si distinguono chiaramente.

L'analisi approfondita delle variazioni di luminosità dei due corpi fornirà informazioni sulla mutevole struttura delle loro rarefatte atmosfere di metano. Rudolf Albrecht della Space Telescope European Coordinating Facility, che ha diretto le osservazioni di Plutone compiute da Hubble, spera che l'elaborazione al calcolatore delle immagini riesca a rivelare anche qualche caratteristica della superficie. Misurazioni precise delle orbite di Plutone e di Caronte permetteran-

Questa immagine a colori di Giove deriva da tre fotografie in bianco e nero, riprese ciascuna con un filtro che evidenzia certi particolari; ricevono poi colori convenzionali e vengono combinate analogamente a quanto si fa per le immagini televisive.

La correzione delle immagini al calcolatore permette a Hubble di avvicinarsi alla risoluzione prevista in fase di progetto. Un'immagine grezza di Saturno (*a sinistra*) sembra uscita dal telescopio di un astrofilo, mentre la versione corretta (*a destra*) vanta una ricchezza di particolari che solamente le sonde spaziali possono superare.

Il sistema di Eta Carinae è costituito da una nube di polvere espulsa da una stella instabile di massa enorme. Le fotografie realizzate da terra (*a sinistra*) rivelano solo il profilo generale della nube, mentre una immagine di Hubble elaborata al calcolatore (*a destra*) mostra getti complessi e onde di materia. La riga verticale e le divisioni tratteggiate sono artefatti dovuti al metodo di elaborazione dell'immagine.

no inoltre di determinare esattamente la massa e la densità di ciascuno dei due oggetti, un'informazione che darà a sua volta indicazioni sulla composizione e l'origine di questi corpi così enigmatici.

Al di là del sistema solare, Hubble ha osservato la meravigliosa nebulosa di Orione, una chiazza di gas luminoso ionizzato visibile a occhio nudo come la «stella» centrale della spada di Orione. È in grandi nubi simili a questa che nascono le stelle. La nebulosa di Orione si trova a 1500 anni luce di distanza ed è quindi la più vicina tra le regioni di formazione di stelle. Nel corso degli anni gli astronomi l'hanno studiata ampiamente ed erano convinti di conoscerne bene la struttura, almeno fino a quando sono arrivate le immagini di Hubble.

La Wide Field and Planetary Camera ha realizzato tre pose da 10 minuti ciascuna della nebulosa, riunite successivamente in un'unica immagine a colori. Il risultato rivela strutture grandi appena 0,1 secondi d'arco (che alla distanza della nebulosa sono pari a circa sei miliardi di chilometri, più o meno il raggio del sistema solare). L'immagine è costellata di archi frastagliati, filamenti e cortine di gas ionizzato, tutte strutture mai osservate in precedenza. C. Robert O'Dell della Rice University, responsabile dello studio della nebulosa di Orione, vi ha notato anche vari addensamenti luminosi, costituiti da gas ionizzato dall'emissione ultravioletta delle caldissime stelle appena nate immerse nella nebulosa. Alcuni studiosi hanno però buttato acqua sul fuoco dell'entusiasmo generale, facendo notare che i metodi di elaborazione delle immagini avrebbero potuto produrre formazioni spurie. La nebulosa di Orione rappresenta quindi un esempio perfetto della miscela di entusiasmo e frustrazione che attende gli astronomi ogni volta che lavorano con Hubble.

Una scoperta che ha suscitato grandissimo interesse riguarda una fase più tarda dell'evoluzione stellare, l'inizio della formazione di pianeti. Nel 1983 l'*Infrared Astronomical Satellite* aveva mostrato che la stella vicina Beta Pictoris, a 54 anni luce dalla Terra, è circondata da un sottile disco di gas e polvere del diametro di almeno 80 miliardi di chilometri, cioè quasi 10 volte più grande dell'orbita di Plutone. Si ritiene che dischi di questo tipo siano la materia prima dalla quale si condensano i sistemi planetari. Per scoprirne di più, Albert Boggess del Goddard Space Flight Center e collaboratori hanno studiato con l'High-Resolution Spectrograph la radiazione ultravioletta di Beta Pictoris.

Secondo Boggess, parte del gas che circonda la stella sta cadendo su di essa. Per di più lo spettro è variabile, forse perché la rotazione del disco frappone tra Beta Pictoris e la Terra addensamenti di materia che assorbe la radiazione. La rapidità della variazione fa pensare che il disco sia poco uniforme: alcune variazioni spettrali si verificano in meno di un mese. Può darsi quindi che il disco stia ricevendo materia, forse gas che evapora da oggetti simili a comete in orbita intorno alla stella.

I dati di Hubble non rivelano se intorno a Beta Pictoris si trovino pianeti completamente formati. La maggior parte degli astronomi non si convincerà della scoperta di un pianeta extrasolare finché non ne verrà fotografato uno. In questo settore il difetto ottico del telescopio spaziale ha avuto conseguenze esiziali: l'alone nebuloso di luce stellare diffusa prodotto dallo specchio cancellerebbe del tutto la fioca luce riflessa da eventuali pianeti anche nei sistemi stellari più vicini. Un serio tentativo di trovare pianeti extrasolari, uno dei progetti fondamentali previsti per Hubble, dovrà attendere la correzione del sistema ottico.

Beta Pictoris è una stella simile al Sole, piuttosto tranquilla. L'obiettivo di massima priorità per la prima serie di osservazioni di Hubble era invece Eta Carinae, una stella instabile in rapida evoluzione situata a 9000 anni luce di distanza nel cielo australe. Con una massa pari a circa 100 volte quella del Sole e una luminosità di quattro milioni di unità solari, Eta Carinae è forse la stella più massiccia e luminosa della Galassia. Nel 1843 ha avuto un brillamento che l'ha resa per un breve periodo la seconda stella del cielo in ordine di luminosità.

Osservazioni successive hanno mostrato che intorno alla stella aveva cominciato a formarsi una piccola nebulosa, NGC 3372, detta Omuncolo.

Nelle migliori osservazioni da terra NGC 3372 appare come una piccola nebulosa indistinta e oblunga. Hubble invece ha rivelato una struttura molto più complessa, a forma di arachide con due getti contrapposti molto collimati che fuoriescono dalla zona centrale. La nube ha un aspetto granuloso e un bordo esterno molto netto, il che fa pensare che si tratti in realtà di un guscio cavo, sottile e polveroso, non di una struttura piena. È costituita presumibilmente da materia che Eta Carinae ha espulso, oppure raccolto, a seguito dell'esplosione.

Uno dei getti termina con una struttura a U. Si tratta probabilmente di un'onda d'urto di prua che si sarebbe sviluppata mentre il getto si faceva strada attraverso la materia interstellare più lenta che circonda la stella. Da un lato di Eta Carinae si protende una struttura incomprensibile: una serie di righe parallele di gas luminoso, che assomigliano ai pioli di una scala. Potrebbero essere onde stazionarie delle dimensioni di anni luce, analoghe alle onde sonore nelle canne di un organo; oppure potrebbero essere «increspature» formate dallo scorrimento rapido di materia lungo l'onda d'urto del getto. Di nuovo, la possibilità che il processo di elaborazione al calcolatore abbia fatto apparire artificialmente strutture inesistenti complica l'interpretazione dell'immagine.

Benché Hubble abbia reso ancor più fitto il mistero di Eta Carinae, ha però dato risposta a un annoso problema relativo a un abitante più lontano della Galassia, l'ammasso globulare M 15. Gli ammassi globulari sono formazioni sferiche serrate comprendenti fino a un milione di stelle. Molti astronomi ritengono che una simile concentrazione dovrebbe portare facilmente alla formazione di un buco nero, un oggetto collassato da una attrazione gravitazionale tanto intensa che neppure la luce può sfuggirne. Altri però non sono d'accordo e ipotizzano invece che il moto rapido delle stelle, soprattutto delle binarie, nelle vicinanze del centro possa contribuire a sostenere la struttura impedendo un collasso catastrofico.

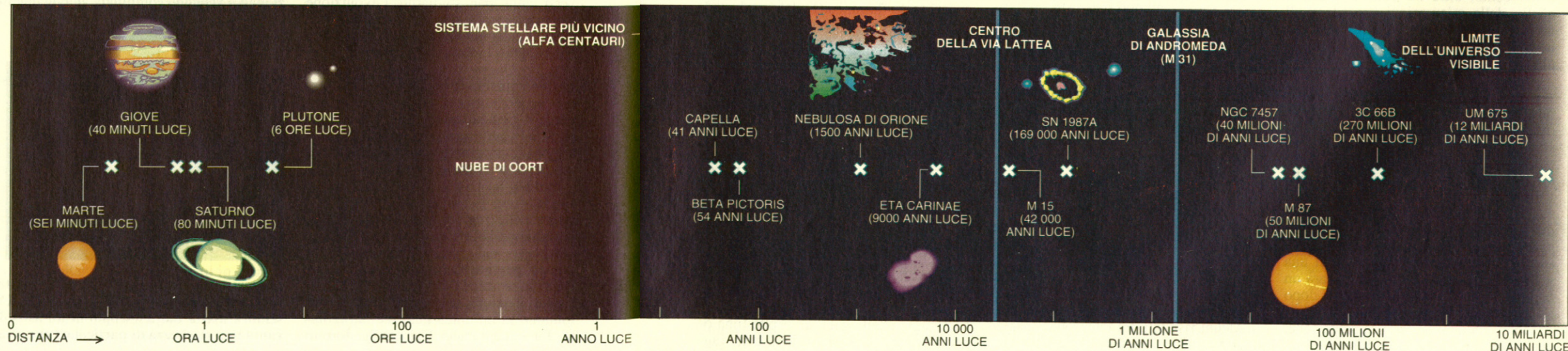
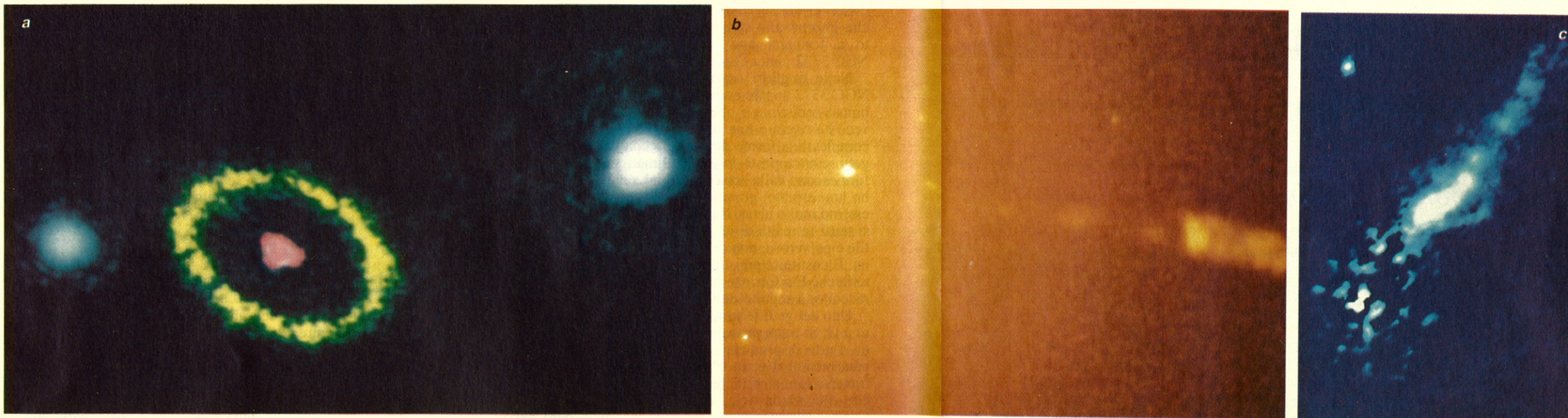
Un candidato probabile al ruolo di buco nero era proprio il centro dell'ammasso brillante M 15, che si trova a 42 000 anni luce di distanza nella costellazione di Pegaso. Il buco nero in sé risulterebbe invisibile, ma la regione immediatamente circostante dovrebbe emettere quantità enormi di radiazione, in quanto la materia, sottoposta a sollecitazioni estreme e a un intensissimo attrito di marea, raggiungerebbe temperature incredibilmente elevate prima di sparire per sempre. Un buco nero dovrebbe quindi produrre un caratteristico punto brillante al centro dell'ammasso. Fino a oggi nessun telescopio era in grado di vedere il nucleo con una risoluzione tale da far emergere questo picco di luminosità, ma Hubble riesce a distinguere all'interno di M 15 particolari di appena 0,02 anni luce, vicini al diametro teorico di un buco nero con una massa pari a 1000 volte quella del Sole.

Tod R. Lauer del Kitt Peak National Observatory e colleghi hanno cercato un picco di luminosità in M 15 e, non essendo riusciti a trovarlo, hanno fatto ricorso a un'altra tecnica. Hubble è in grado di risolvere le giganti rosse brillanti della periferia di M 15 permettendo agli studiosi di sottrarne il contributo all'immagine. Ciò che è rimasto è una regione centrale contenente migliaia di stelle deboli sparpagliate in un raggio stranamente ampio di 0,4 anni luce, 10 volte maggiore di quello previsto dai modelli dei buchi neri. Questi risultati tendono a far pensare che M 15 non contenga un buco nero centrale, una conclusione che farà tirare un sospiro di sollievo a tutti gli astrofisici che non amano la tendenza oggi in gran voga a invocare un buco nero invisibile per spiegare qualsiasi sistema di alta energia dell'universo.

Uno degli oggetti dei quali gli astronomi attendevano con ansia maggiore le immagini di Hubble è il resto di SN 1987A, la supernova brillante comparsa nel 1987 nella Grande Nube di Magellano, una galassia satellite della Via Lattea. Il 23 agosto 1990 la Faint Object Camera trasmise una posa da 28 minuti di SN 1987A. L'immagine che apparve sugli schermi dei calcolatori allo Space Telescope Science Institute mostrava un anello di materia luminescente del diametro di 1,4 anni luce intorno al resto di supernova. L'esistenza dell'anello lasciò esterrefatti quasi tutti coloro che si trovavano nella stanza, ma non il collega Nino Panagia, che aveva addirittura previsto la formazione di una struttura esterna assai particolare.

La caratteristica più curiosa dell'anello della supernova è che appare ellittico anziché circolare. Questa forma implica che non si tratti di un guscio tridimensionale (ve ne sono intorno a molte nebulose planetarie e per effetto prospettico sembrano spesso anelli circolari): pare che sia un vero e proprio toro circolare inclinato di 43 gradi rispetto alla linea di vista tanto da apparire ellittico. È impossibile che una struttura di questo tipo sia stata prodotta dalla supernova stessa: deve trattarsi di un resto degli strati esterni espulsi dalla stella gigante rossa che ha generato la supernova.

Panagia ritiene che migliaia di anni prima dell'esplosione un lieve vento stellare abbia portato via l'involucro esterno della stella, soprattutto sul piano equatoriale. In seguito un vento più veloce avrebbe compresso la materia espulsa formando un anello di gas. La radiazione ultravioletta dell'esplosione di supernova avrebbe poi riscaldato e ionizzato il gas facendolo splendere. Nel giro di qualche decennio l'anello do-

Le osservazioni astronomiche realizzabili da Hubble coprono un intervallo di distanze enorme. Plutone si trova a una distanza media di sei ore luce dalla Terra (un'ora luce equivale a circa un miliardo di chilometri), mentre il quasar UM 675 dista 12 miliardi di anni luce. Le distanze sono in scala logaritmica.

Questa immagine in falsi colori (*a*), che è stata realizzata con lo Hubble Space Telescope, rappresenta la supernova 1987A. Un anello di materia del diametro di 1,4 anni luce (*in giallo*) circonda i resti della supernova (*in rosa*). M 87, una galassia ellittica gigante, presenta un nucleo eccezionalmente brillante e denso e un enorme getto di gas ionizzato (*b*). Entrambe queste caratteristiche potrebbero indicare l'esistenza di un buco nero di grande massa nella regione centrale della galassia; sembra che la materia, cadendo nel buco nero, brilli intensamente prima di scomparire. Dal nucleo della galassia 3C 66B si diparte un getto attorcigliato (*c*) che si estende per circa 10 000 anni luce; l'immagine della galassia è stata sottratta elettronicamente per evidenziare il getto. La radiazione ultravioletta qui registrata proviene da elettroni che si muovono a spirale in un campo magnetico con una velocità quasi uguale a quella della luce.

vrebbe disintegrarsi disperso dai frammenti della supernova che si stanno muovendo verso l'esterno a una velocità media di 10 000 chilometri al secondo. Hubble continuerà a seguire la proteiforme struttura del resto di SN 1987A.

Le osservazioni della supernova compiute da Hubble hanno migliorato di molto la stima della distanza della Grande Nube di Magellano. Le immagini mostrano infatti con precisione notevole l'estensione angolare dell'anello; il satellite *International Ultraviolet Explorer* aveva dal canto suo rilevato il momento in cui il bordo interno e poi quello esterno dell'anello avevano iniziato a splendere. Disponendo di queste informazioni, e dato che la velocità della luce è ben nota, si ricava il diametro effettivo dell'anello dal quale, con semplici calcoli trigonometrici, si ottiene la distanza della supernova e quindi della galassia che la circonda: 169 000 anni luce. Questa valutazione ha un margine di errore del 5 per cento, oltre tre volte inferiore a quello delle misurazioni precedenti. Il dato sarà importante per calibrare la scala delle distanze di altri oggetti celesti più lontani.

Purtroppo la capacità di Hubble di misurare le distanze delle galassie in generale è gravemente pregiudicata. Il difetto ottico del telescopio gli impedisce di distinguere singole variabili cefeidi all'interno delle galassie lontane. Queste stelle rivestono il massimo interesse perché variano di luminosità in maniera regolare e il periodo della variazione dipende dalla luminosità assoluta. Le osservazioni delle cefeidi permettono quindi di misurare con sicurezza la distanza di una galassia. Lo studio delle cefeidi sarà un compito importante per Hubble dopo che sarà stato riparato nel 1994.

Molti ritengono erroneamente che, per la sua ridotta capacità di raccogliere la luce, Hubble non possa studiare oggetti celesti lontani. Niente di meno vero: il telescopio spaziale ha compiuto osservazioni significative di oggetti vicini al limite dell'universo visibile, e ha anche permesso di studiare a un livello di risoluzione mai raggiunto prima il nucleo di galassie che si trovano al di là del Gruppo locale. Ne è risultata una serie di scoperte notevoli e a volte inattese.

Uno dei primi obiettivi extragalattici di Hubble è stato NGC 7457, una galassia ellittica distante circa 40 milioni di anni luce. La galassia era stata scelta come normalissimo oggetto di riferimento, ma quando Lauer e colleghi hanno usato la Wide Field and Planetary Camera per osservarne le regioni centrali hanno avuto una sorpresa. Una percentuale significativa della luce della galassia proviene da una sorgente puntiforme, di diametro non superiore a 10 anni luce, che si trova proprio al centro del nucleo. In quella zona le stelle devono essere almeno 30 000 volte più fitte che nei dintorni del Sole: una densità stellare centinaia di volte più grande del valore previsto dalla teoria.

Il picco di luminosità centrale potrebbe indicare la zona in cui grandi quantità di materia, e forse anche intere stelle, cadono a spirale in un buco nero di massa pari a milioni di volte quella del Sole. Oppure potrebbe trattarsi di qualcosa di meno esotico, ma pur sempre imprevisto, per esempio un ammasso di stelle eccezionalmente ricco. Gli studiosi che lavorano con gli spettrografi di Hubble cercheranno di misurare la velocità orbitale delle stelle e del gas del nucleo per ricavarne la quantità totale di materia presente, un dato che potrebbe rivelare la vera natura dell'oggetto centrale.

Alcuni risultati del telescopio spaziale confermano l'ipotesi che esista davvero un enorme buco nero proprio dove gli astronomi si aspettavano di trovarne uno: nella galassia ellittica gigante M 87, situata nell'ammasso della Vergine a circa 50 milioni di anni luce di distanza. M 87 emette grandi quantità di onde radio e raggi X e dal suo centro si protende un gigantesco getto di gas ionizzato (migliaia di volte più lungo di quelli di Eta Carinae). I teorici avevano accarezzato l'ipotesi che il motore centrale che alimenta tutta questa attività sia un buco nero di grande massa.

In collaborazione con Sandra M. Faber dell'Università della California a Santa Cruz, C. Roger Lynds dei National Optical Astronomy Observatories e altri, Lauer ha fatto ricorso alla Wide Field and Planetary Camera per dirimere la questione. Si è riscontrato che, come avviene in NGC 7457, nella regione centrale di M 87 le stelle raggiungono densità centinaia di volte superiori a quelle di una galassia normale. Se il responsabile della densità e della eccezionale luminosità del nucleo di M 87 è davvero un buco nero, deve avere una massa pari a qualche miliardo di volte quella del Sole.

F. Duccio Macchetto dell'European Space Agency si interessa ai processi violenti che avvengono in galassie attive ancora più lontane. Usando la Faint Object Camera ha raccolto la radiazione ultravioletta di 3C 66B, posta a 270 milioni di anni luce dalla Terra. Hubble ha messo in risalto i particolari dello straordinario getto di plasma luminoso emesso da questa galassia, esteso per 10 000 anni luce dal centro (una lunghezza doppia di quella del getto di M 87).

Sfruttando le tecniche di elaborazione delle immagini al calcolatore, Macchetto ha reso il getto più visibile sottraendo l'immagine della galassia ospite (una operazione possibile dato che il getto raggiunge la luminosità massima nell'ultravioletto, dove la galassia è poco luminosa). I risultati sono stati poi corretti per eliminare l'effetto dell'aberrazione sferica dello specchio, permettendo così di intravvedere filamenti gassosi, addensamenti brillanti e strani ripiegamenti nella materia del getto, particolari mai osservati prima con un telescopio ottico. Il getto presenta una struttura peculiare, costituita da due filamenti di plasma posti a 500 anni luce l'uno dall'altro.

Le caratteristiche osservate corrispondono a quelle identificate tramite l'emissione radio, ma la radiazione visibile del getto è prodotta da elettroni veloci che perdono energia in maniera molto più rapida di quelli relativamente lenti dai quali provengono le onde radio. Gli elettroni di energia più elevata si trovano in zone che hanno subito perturbazioni recenti. Rispetto alle osservazioni radioastronomiche, quindi, i dati di Hubble danno un'immagine molto più aggiornata del comportamento delle forze titaniche che hanno prodotto il getto.

Ulteriori osservazioni di Hubble delle galassie attive e dei loro parenti di più alta energia, i quasar e le galassie di Seyfert, mostreranno in che modo l'energia venga trasportata dal centro lungo i getti. Gli studi compiuti con Hubble contribuiranno anche a determinare il ruolo dei campi magnetici nel convogliare la materia (per lo più elettroni in moto a velocità vicina a quella della luce) dal nucleo delle galassie allo spazio intergalattico. Una migliore conoscenza delle galassie attive aiuterà a capire se i buchi neri siano una spiegazione valida della loro prodigiosa emissione di energia o se invece occorra escogitare spiegazioni nuove, ancora più esotiche, per questi oggetti di straordinaria potenza.

Hubble sta dando un contributo anche alla verifica della teoria del big bang, il fondamento della cosmologia moderna. Secondo questa teoria l'universo attuale, con tutta la materia e tutto lo spazio, è nato esplodendo da una singolarità iniziale circa 15 miliardi di anni fa. Se è vero, gran parte dell'elio dell'universo è stato creato negli attimi immediatamente successivi al big bang; solo una parte si sarebbe formata in seguito, per fusione nucleare all'interno delle stelle.

Margaret E. Burbidge dell'Università della California a San Diego ha cercato di misurare l'abbondanza dell'elio vicino al quasar UM 675, che si trova a circa 12 miliardi di anni luce dalla Terra. Data la sua grande distanza, noi oggi lo vediamo com'era quando l'universo aveva un quinto della sua età attuale. Secondo la teoria del big bang UM 675 conterrebbe quasi la stessa quantità di elio presente negli oggetti a noi più prossimi e di aspetto proporzionalmente più recente; se invece la teoria è sbagliata, l'abbondanza dell'elio nel quasar potrebbe essere quasi nulla. Il Faint Object Spectrograph di Hubble ha rivelato l'inconfondibile «firma» dell'elio, dando conferma all'ipotesi del big bang.

In un altro esperimento Jeffrey Linsky dell'Università del Colorado e colleghi hanno cercato di misurare l'abbondanza cosmica del deuterio. Secondo la teoria, la quantità di deuterio creata subito dopo il big bang rispecchierebbe la densità complessiva dell'universo. Linsky e collaboratori hanno usato lo High-Resolution Spectrograph di Hubble per osservare lo spettro della stella brillante Capella, a 41 anni luce di distanza nella costellazione dell'Auriga. Lo spettro indica la quantità di radiazione assorbita dagli atomi di idrogeno e da quelli di deuterio interposti tra la stella e la Terra.

L'analisi di questi dati induce a ritenere che l'universo contenga solo un decimo della materia ordinaria necessaria per fermarne l'espansione. Molti cosmologi suppongono che esistano particelle esotiche non ancora scoperte in quantità tale da contribuire in misura notevole alla massa totale dell'universo. Se così non fosse, i risultati di Hubble implicherebbero che l'universo sia infinito, destinato a espandersi per l'eternità.

A dispetto dello stillicidio di problemi ottici e meccanici, Hubble va dimostrandosi uno strumento di ricerca di grande potenza. I risultati dei primi due anni di attività danno solo un piccolo assaggio di ciò che il telescopio dovrebbe essere in grado di fare se verrà riparato nel 1994. Dopo essere stati condannati per secoli a veder le stelle sfavillare e vacillare nell'atmosfera turbolenta della Terra, gli astronomi sono entrati finalmente in una nuova era di ricerca, quella delle osservazioni dallo spazio. Lo Hubble Space Telescope ne rappresenta, si spera, solo il primo passo.

BIBLIOGRAFIA

FIELD G. e GOLDSMITH D., *The Space Telescope*, Contemporary Books, 1989.

CHAISSON E. J. e VILLARD R., *The Science Mission of the Hubble Space Telescope* in «Vistas in Astronomy», 33, parte 2, 1990.

KINNEY A. L. e BLADES J. C. (a cura), *The First Year of Hubble Space Telescope Observations*. Proceedings of a Workshop held at the Space Telescope Science Institute, 14-16 maggio 1991, Space Telescope Science Institute, 1991.

The Hubble Space Telescope, due numeri speciali di «Astrophysical Journal Letters», 369, 10 marzo 1991, 337, 10 agosto 1991.

La contabilità delle risorse ambientali

Un paese può tagliare le proprie foreste, inquinare le falde acquifere, ridurre la diversità biologica e portare al degrado ambiente e risorse naturali senza che tutto ciò risulti dal bilancio patrimoniale nazionale

di Robert Repetto

Spesso i naturalisti appaiono costernati e sorpresi quando gli economisti si dimostrano scarsamente interessati alla gravità del degrado ambientale. Una ragione di questa apparente indifferenza va ricercata nel fatto che il sistema contabile degli economisti, e i modelli costruiti su di esso, non assegnano alcun valore economico ai cambiamenti nell'ammontare delle risorse naturali. Il sistema va dunque ristrutturato se, a livello politico, si deve prendere in considerazione la distruzione dei sistemi naturali attualmente in corso e attribuirne la responsabilità.

Vecchio di 50 anni, il sistema standardizzato nel System of National Accounts (SNA) delle Nazioni Unite ignora completamente le cruciali modificazioni ambientali dei nostri tempi: il marcato deterioramento delle risorse naturali in gran parte del mondo in via di sviluppo e le crescenti pressioni sui sistemi globali di sostegno alla vita, come il clima e la diversità biologica. Questi cambiamenti potranno influire sullo sviluppo futuro dell'economia mondiale, ma se non si considera il valore in attivo delle risorse naturali, il sistema contabile che è alla base dei principali strumenti di analisi economica sarà inevitabilmente fonte di travisamento nelle scelte politiche che i paesi si trovano a dover affrontare.

Fortunatamente in un momento in cui un sempre maggior numero di paesi sta adottando le strategie politiche e le istituzioni dell'economia di mercato, questo modello metodologico è, per la prima volta in 20 anni, in corso di revisione. La situazione presenta un'opportunità da non perdere per correggere un difetto fondamentale.

Quali che ne siano le manchevolezze e per quanto poco sia compresa dal cittadino comune, la compilazione della contabilità relativa al reddito nazionale rappresenta indubbiamente una delle più significative conquiste sociali del XX secolo. Non è una coincidenza che da quando sono disponibili questi dati i Governi di tutti i grandi paesi si siano assunti la responsabilità della crescita e della stabilità delle rispettive economie e ingenti investimenti di capacità e di energie siano stati fatti per comprendere come gestire meglio l'economia. È difficile che possa essere sopravvalutato l'impatto politico ed economico di questi strumenti. Se negli Stati Uniti, per esempio, il prodotto interno lordo (PIL) trimestrale risultasse anche solo di poco inferiore a quello dei tre mesi precedenti, si parlerebbe di recessione, verrebbe contestata la competenza dell'amministrazione e ne seguirebbe un pubblico dibattito. In tutto il mondo il tasso di crescita del PIL è la misura fondamentale del progresso economico.

L'attuale sistema di contabilità economica nazionale riflette il modello macroeconomico keynesiano, modello che prevaleva quando il sistema venne sviluppato. I grandi aggregati dell'analisi keynesiana - consumo, risparmio e investimento - sono attentamente definiti e misurati. Ma Keynes e i suoi contemporanei erano tutti presi dalla grande depressione e dal ciclo economico, e dato che i prezzi all'ingrosso erano allora a un minimo assoluto, la scarsità delle risorse naturali era l'ultimo dei loro pensieri. Sfortunatamente, come l'analisi keynesiana ignorava quasi del tutto il ruolo produttivo delle risorse naturali, così fa il sistema attuale di contabilità nazionale.

In effetti, la scarsità di risorse naturali interessava poco l'economia neoclassica del XIX secolo dalla quale è derivata la maggior parte delle teorie economiche contemporanee. All'Europa del XIX secolo affluivano in abbondanza cereali e materie prime dall'America, dall'Australia, dalla Russia e dalle colonie, e l'affermarsi della macchina a vapore nella navigazione marittima e nelle ferrovie abbassava i costi di trasporto. Vennero dimenticate le deprimenti previsioni di Ricardo, Malthus, Marx e di altri precedenti economisti classici, secondo le quali le economie industriali sarebbero andate incontro a stagnazione o a collasso a causa del crescente aumento dei canoni fondiari e dei salari minimi. All'Inghilterra e alle altre nazioni industriali ciò che importava era il ritmo degli investimenti e della trasformazione tecnologica.

Gli economisti classici consideravano il reddito come l'utile di tre tipi di beni: risorse naturali, risorse umane e capitale investito; gli economisti neoclassici eliminarono quasi totalmente dal loro modello le risorse naturali e si concentrarono sul lavoro e sul capitale investito. Quando, dopo la seconda guerra mondiale, si cercò di applicare queste teorie ai problemi dello sviluppo economico del Terzo Mondo, anche le risorse umane vennero lasciate da parte sulla base del fatto che la manodopera era sempre in eccesso e che lo sviluppo era visto quasi interamente come una questione di risparmio e di investimento in capitale fisico.

Di conseguenza vi è una pericolosa asimmetria nel modo in cui gli economisti misurano, e quindi considerano, il valore delle risorse naturali. Immobili,

In questo frutteto a terrazze della Costa Rica sono ancora visibili i ceppi degli alberi tagliati per fare posto alla coltivazione agricola. Lo sfruttamento agricolo dei versanti scoscesi è spesso insostenibile a causa della rapida erosione del suolo dovuta alle violente precipitazioni.

Dal 1970 la deforestazione ha distrutto in Costa Rica oltre un quarto dell'area a foresta. La perdita di questa risorsa ha danneggiato le potenziali capacità di reddito del paese, anche perché nel periodo il valore di alcune specie è quadruplicato.

attrezzature e altri prodotti industriali sono considerati alla stregua di capitale redditizio e il loro ammortamento è stornato come passivo dal valore della produzione. Con questa pratica si ammette che il consumo non possa proseguire indefinitamente semplicemente riducendo le disponibilità di capitale senza reintegrarlo. Il bene economico rappresentato dalle risorse naturali non è però così apprezzato. La loro perdita, anche se può condurre in futuro a una significativa diminuzione di produzione, non comporta alcun carico passivo sull'utile corrente.

Nonostante che nello SNA delle Nazioni Unite (compilato d'altra parte soltanto da pochi paesi) il bilancio patrimoniale riconosca la terra, i minerali e il legname come voci economiche da includere nel fondo capitale di una nazione, ciò non avviene nei conti del prodotto e del reddito nazionali dello SNA. Questo metodo è fondamentalmente incoerente. A rigor di logica, se i bilanci patrimoniali di un paese relativi a due momenti differenti indicano che una voce economica, per esempio una foresta, è diminuita, allora i conti del prodotto e del reddito degli anni intercorsi dovrebbero registrare un addebito per tale diminuzione. Questo deriva da quella che probabilmente è la più importante relazione caratteristica della contabilità: la differenza nella disponibilità di un bene fra due punti temporali è uguale al flusso netto nel periodo che intercorre. Per esempio, la differenza tra il patrimonio netto di una persona all'inizio e alla fine di un anno non può che essere uguale al suo risparmio netto (anche negativo) nel corso dell'anno.

Il System of National Accounts delle Nazioni Unite viola questa equazione fondamentale per quanto riguarda le voci delle risorse naturali. Per ironia della sorte, ai paesi a basso reddito, che dipendono maggiormente dalle risorse naturali per occupazione, profitti ed entrata di valuta estera, si insegna ad adottare un sistema di contabilità nazionale che ignora quasi completamente le loro principali voci economiche.

Alla base di questa incongruenza vi è l'assunzione errata che le risorse naturali siano così abbondanti da non avere alcun valore marginale. Infatti sia che entrino direttamente nel mercato o no, le risorse naturali contribuiscono in maniera fondamentale alla produttività economica sul lungo termine. Un altro equivoco è che le risorse naturali siano «doni gratuiti della natura», cosicché non vi sono costi di investimento da stornare di per sé. Il valore di una voce economica non è però il suo costo di investimento, ma il valore attuale del suo potenziale di reddito. Le usuali formule per calcolare il deprezzamento stornando un costo di investimento sono soltanto regole empiriche: la vera misura del deprezzamento è rappresentata dal valore attuale capitalizzato della riduzione che si avrà nel reddito futuro di una voce economica a causa del suo deterioramento o della sua obsolescenza. Allo stesso modo in cui una macchina si deprezza perché si logora, un suolo si deprezza a mano a mano che diminuisce la sua fertilità, dato che può dare lo stesso raccolto solo a costi più alti.

Codificato nello SNA delle Nazioni Unite, il preconcetto nei confronti delle risorse naturali induce i politici a rinforzarsi nella falsa credenza che esista una dicotomia fra economia e ambiente, portandoli così a ignorare o distruggere il secondo in nome della crescita economica. Si confonde la diminuzione di voci economiche preziose con la produzione di reddito, con il risultato di illusori aumenti di reddito e perdite permanenti di ricchezza.

Non vi è nulla di sbagliato nell'uso delle risorse naturali per il finanziamento della crescita economica, specialmente nei paesi che dipendono da quelle risorse. I proventi provenienti dall'estrazione di risorse possono finanziare investimenti produttivi in impianti industriali, in infrastrutture e istruzione. Una registrazione contabile ragionevole di questo processo dovrebbe però riconoscere che un tipo di bene economico è stato scambiato con un altro. Se un agricoltore tagliasse e vendesse il legname del suo bosco per avere il denaro per comprare un nuovo fienile, la sua contabilità privata riporterebbe l'acquisto di una nuova voce redditizia, il fienile, e la perdita di una voce vecchia, il lotto a bosco. L'agricoltore pensa di essere in condizioni finanziarie migliori perché il fienile vale per lui più del legname. Nella contabilità nazionale, però, reddito e investimento aumentano con la costruzione del fienile, ma il reddito sale anche quando si taglia il bosco. In nessun posto vi è traccia della perdita di un bene prezioso. Ancor peggio, se l'agricoltore usasse il ricavo della vendita del legname per pagarsi una vacanza invernale, al ritorno sarebbe più povero e non più in grado di costruire il fienile. Eppure il reddito nazionale continuerebbe a registrare un guadagno.

Una corretta definizione di reddito deve includere la nozione di sostenibilità, in analogia alla definizione di sviluppo sostenibile data dalla World Commission on Environment and Development (la Commissione Brundtland): ciò che soddisfa le necessità della generazione attuale senza sacrificare il benessere di quella futura. Questo concetto di reddito include non solo gli attuali guadagni, ma anche le modificazioni nella collocazione delle varie voci economiche: i redditi di capitale (plusvalenza) sono equivalenti a un aumento di reddito e le perdite di capitale (minusvalenza) a una riduzione di reddito.

L'esperienza della Costa Rica dimostra come la mancata registrazione delle risorse naturali nelle voci del bilancio nazionale possa condurre al disastro economico. A molti naturalisti la Costa Rica è nota per essere il paese dell'emisfero occidentale che si colloca al primo posto nella conservazione dell'ambiente naturale. Infatti ha destinato un quinto del suo territorio a parchi nazionali ed è sede di programmi pionieristici nel campo del turismo naturalistico e dell'ecologia del recupero. Eppure durante gli ultimi 20 anni le risorse naturali della Costa Rica sono andate incontro a un devastante deterioramento.

Uno dei più alti tassi di deforestazione che si siano avuti nell'emisfero occidentale ha portato alla perdita del 30 per cento delle foreste del paese; inoltre, la foresta è stata semplicemente bruciata per farne pascolo scarsamente produttivo o terreno agricolo collinoso sacrificando sia prezioso legname tropicale sia miriadi di specie vegetali e animali, soprattutto insetti. Poiché la maggior parte dell'area sottratta alla foresta era inadatta per l'agricoltura, il suolo ha subìto un'erosione accelerata. Mediamente le perdite relative alla terra destinata alle coltivazioni di interesse agricolo hanno superato le 300 tonnellate per ettaro e sono state di quasi 50 tonnellate per ettaro le perdite relative agli appezzamenti destinati a pascolo. Si è valutato che fra il 1970 e il 1989 siano andati perduti 2,2 miliardi di tonnellate di suolo, un quantitativo sufficiente a seppellire la capitale San José a 12 metri di profondità. Nel frattempo l'inquinamento e lo sfruttamento idrico incontrollato hanno provocato la devastazione delle scogliere coralline e della pesca costiera.

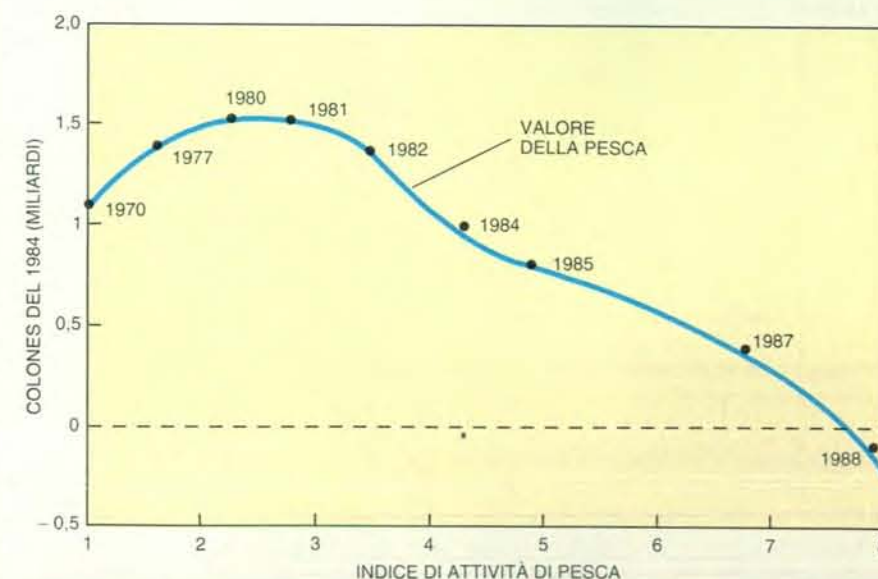
Poiché in Costa Rica foreste, pesca, agricoltura ed estrazione mineraria contribuiscono per il 17 per cento al reddito nazionale, per il 25 per cento all'occupazione e per il 55 per cento ai proventi delle esportazioni, questa distruzione ha causato gravissime perdite economiche. Nel 1989 si è assistito alla distruzione di 3,2 milioni di metri cubi di legname commerciale del valore di oltre 400 milioni di dollari, cifra che, pari a 69 dollari per abitante, superava del 36 per cento quella dei pagamenti sul debito estero. L'erosione ha asportato dai terreni agricoli e dai pascoli sostanze nutritive per un valore pari al 17 per cento del valore dei raccolti annuali e al 14 per cento del valore della produzione zootecnica. Il deterioramento del patrimonio faunistico nelle principali zone di pesca è stato così grave che i proventi dei pescatori sono scesi al di sotto del livello degli assegni assistenziali agli indigenti. Eppure nel sistema di contabilità nazionale della Costa Rica non vi è traccia di queste perdite economiche.

Quando, agli inizi degli anni ottanta, la Costa Rica precipitò in difficoltà economiche, la diagnosi degli economisti fu di una crisi dovuta ai debiti. Le passività nei conti con l'estero erano aumentate e il pagamento degli interessi e il rimborso dei prestiti diventavano sempre più gravosi. Il Fondo monetario internazionale intervenne prontamente con programmi per la stabilizzazione della base monetaria, ma nessuno parlò di stabilizzare la base delle risorse naturali, anche se la perdita in certe risorse - foreste, suolo e pesca - era stata molto maggiore dell'aumento delle passività con l'estero e aveva tolto al paese i proventi delle esportazioni che avrebbero potuto essere destinati al pagamento dei debiti con l'estero. La ragione di questo comportamento era dovuta al fatto che l'accumulo delle passività nei conti con l'estero era stato registrato e attentamente studiato, mentre la diminuzione di valore delle risorse naturali, essendo nascosta, veniva ignorata.

Al fine di ottenere un quadro accurato di quanto era accaduto, il Tropical Sciences Center di Costa Rica e il World Resources Institute hanno collaborato alla compilazione di un conto delle risorse naturali (il suolo, foreste e pesca) relativo al periodo 1970-1989. Le stime delle variazioni nella copertura forestale, nell'area a mangrovie e in altre destinazioni della terra furono basate su dati raccolti periodicamente con sistemi di telerilevamento anche da satellite. Le informazioni sul tipo, volume, crescita e composizione delle foreste furono ottenute con estesi e minuziosi studi sul campo, mentre le stime dell'erosione del suolo vennero fatte ricorrendo a mappe relative alla topografia, alla piovosità, ai tipi di suolo e ai vari usi del territorio. Il resoconto contabile relativo alla pesca venne basato su campionamenti delle popolazioni ittiche.

La perdita più evidente nelle risorse naturali della Costa Rica era la distruzione delle foreste. Si costruì una contabilità delle foreste sulla base di mappe dettagliate relative a bioclima, tipi di suolo, geologia e topografia, alle quali vennero sovrapposte mappe relative agli usi della terra nel periodo allo studio. Vennero così stimate le percentuali delle varie specie arboree in ciascuna area a foresta, insieme con la distribuzione per età, volumi di legname e velocità di crescita. I risultati così ottenuti sono molto più accurati e dettagliati di quelli degli inventari convenzionali del patrimonio forestale effettuati per scopi commerciali.

Per stimare l'entità della deforestazione l'analisi passò poi a esaminare i cambiamenti di destinazione della terra. Fra il 1966 (l'anno più vicino al 1970 per il quale si disponeva di dati sull'uso della terra) e il 1989, si sono perduti 847 000 ettari, pari al 28 per cento dell'estensione delle foreste costaricane. Le perdite più ingenti riguardavano le foreste d'altura e le foreste pluviali tropicali, proprio quelle caratterizzate dalla diversità biologica più ricca. Ben due terzi della deforestazione riguardavano aree ecologiche per le quali la destinazione a foresta rappresentava l'uso sostenibile maggiormente intensivo. Nonostante la responsabilità preponderante dell'industria zootecnica nella deforestazione, solo il 14 per cento dell'area disboscata era adatto al pascolo.

La contabilità materiale completa correlava le variazioni dei volumi in piedi con il raccolto e la deforestazione annui, e anche con la crescita e la ricostituzione nelle restanti aree a foresta. La contabilità a valori correnti era basata su stime del valore del legname non tagliato, che variava a seconda delle specie, della maturità delle piante e della distanza dalle segherie. Nel corso del tempo la frazione di capitale forestale che poteva essere commercializzata era aumentata sostanzialmente. Il valore del legname non tagliato in prezzi costanti era salito dal

L'andamento della curva dello sfruttamento ittico mostra come in Costa Rica, a fronte di un aumento dell'attività di pesca (calcolata con un indice messo a punto dal Tropical Sciences Center), i profitti siano in realtà diminuiti o persino azzerati.

1970 di un ammontare compreso fra le 4 e le 10 volte, a seconda della varietà del legno, a dimostrazione di quanto sia stata miope la sfrenata distruzione delle foreste.

In realtà, nonostante che negli ultimi 20 anni si sia avuta una diminuzione nel tasso di deforestazione, il deterioramento del bene foreste è drammaticamente aumentato perché le varietà di legno duro che sono state distrutte sono diventate più pregiate. Per tutti gli anni ottanta la selvicoltura ha avuto livelli di reddito interno netto sostanzialmente negativi: il valore del capitale forestale distrutto ha superato di gran lunga il valore dei prodotti forestali generati.

Gran parte del territorio costaricano è in ripida pendenza e soggetto a intense precipitazioni piovose, cosicché la diminuzione della copertura a foresta porta a un'erosione rapida. Le stime dell'entità dell'erosione del suolo furono calcolate più o meno sulla stessa base empirica adottata per contabilizzare la voce foreste: minuziose mappe topografiche e geologiche, oltre a mappe del tipo di suolo, delle precipitazioni e dell'uso della terra. Da queste cifre gli analisti hanno sottratto le stime dei tassi di erosione che si sarebbero avuti con il miglior uso sostenibile della terra per ogni unità territoriale. L'erosione totale ammontava mediamente a 92 tonnellate per ettaro considerando tutti gli usi della terra e l'erosione non sostenibile era in media di quasi 300 tonnellate per ettaro relativamente alla terra destinata a colture annuali. A causa della diminuzione dell'area coperta da foreste, l'erosione totale era salita fra il 1970 e il 1984 da 122 milioni di tonnellate all'anno a 189 milioni di tonnellate.

La perdita monetaria risultante è comprensiva sia della diminuzione della produttività agricola sia dei danni esterni causati dal dilavamento di così enormi quantità di suolo. Dei danni esterni si potrebbero fare solo stime parziali, basate per esempio sugli effetti della sedimentazione negli impianti idroelettrici. La stima globale dei costi dell'erosione del suolo a carico della produttività agricola venne basata sul costo del rimpiazzo delle principali sostanze nutritive perse con la scomparsa dello strato superficiale del suolo, il cosiddetto suolo agrario. Questo metodo fornisce solamente una prima approssimazione, dato che l'erosione danneggia anche la struttura del suolo e l'attività biologica oltre a rimuovere importanti sostanze nutritive presenti in traccia.

I conti così ottenuti indicano un aumento della perdita grosso modo proporzionale all'estensione della terra destinata a uso agricolo. I raccolti annui, specialmente nelle colture su versanti soggetti a intense precipitazioni, contribuiscono in misura massima al deprezzamento stimato, ma anche le zone adibite a pascolo, essendo il pascolo preponderante sugli altri usi della terra, sono responsabili di circa un terzo della perdita totale. Il deterioramento del suolo incide in media per il 13 per cento sul valore aggiunto della produzione zootecnica, per il 17 per cento su quello delle colture agricole annue e per l'8-9 per cento su tutta la produzione agricola.

Nello stesso periodo in cui foreste e suolo subirono gravi danni, il valore dell'industria della pesca nella più importante zona di pesca della nazione era stato spazzato via. In Costa Rica l'industria della pesca ha una struttura sostanzialmente artigianale; non è regolamentata e inoltre viene sovvenzionata con prezzi agevolati per il gasolio e con benefici fiscali. Negli anni ottanta il numero delle piccole imbarcazioni da pesca crebbe rapidamente, dato che le opportunità di occupazione alternativa nelle aree urbane e rurali ristagnavano. Nel frattempo si sono fatte sempre più evidenti le prove di un eccessivo sfruttamento: vengono pescati sempre meno pesci di specie pregiata e il rapporto fra il pescato e l'impegno speso è diminuito costantemente. Dato che le risorse ittiche non possono essere misurate direttamente, i cambiamenti nel valore della industria della pesca nella più ricca zona ittica, il Golfo di Nicoya, vennero stimati costruendo un modello bioeconomico che correlava produttività sostenibile e impegno speso. È stato creato un indice di attività di pesca in base a classi di potenza e capacità dei pescherecci, in modo da ottenere un dato in grado di riflettere la relativa quantità giornaliera di pescato per ogni tipo di imbarcazione.

In questo quadro si può stimare il valore dell'industria della pesca come il valore capitalizzato del profitto annuo sostenibile che può generare. Nel corso degli anni ottanta, con il crescere dell'attività della pesca, i profitti sono diminuiti. Già nel 1988 i pescatori potevano a mala pena recuperare i costi diretti anche supponendo che il loro tempo non valesse più dell'indennità di sussistenza data ai disoccupati, solo una frazione del salario agricolo minimo. In altre parole, il valore della voce economica pesca era pari a zero.

Questi tre insiemi di conti dimostrano che la Costa Rica sta rapidamente esaurendo il suo capitale naturale. Dal 1970 al 1989 il deprezzamento maturato del valore di foreste, suolo e pesca del paese superava i 4,1 miliardi di dollari del 1984, più del valore medio del prodotto interno lordo di un anno. In confronto alle dimensioni dell'economia, si tratta di una perdita annuale enorme. Sarebbe come se negli Stati Uniti l'intero bilancio della difesa scomparisse ogni anno senza lasciare traccia.

Eppure questa è solo una parte della perdita effettivamente verificatasi. Per quanto riguarda le foreste, le cifre includono solo la perdita del valore attuale e futuro del legname, ma le foreste costaricane sono importanti anche per altri aspetti (come habitat per gli animali selvatici, attrazione turistica, regolatore di ecosistemi e produttore di beni diversi dal legname), ma questo valore è ancora da stimare. Per quanto riguarda il suolo, nel calcolarne il deprezzamento si è tenuto conto solo della perdita legata all'erosione delle principali sostanze nutritive essenziali per la crescita delle piante. Non sono state considerate altre modificazioni dannose sempre causate dall'erosione, come la perdita di sostanze nutritive in traccia, di attività microbiologica e di una idonea struttura del suolo, fattori tutti che ne riducono la fertilità. Infine, per quanto riguarda la pesca, è entrata nella contabilità la perdita, per eccessivo sfruttamento, del valore relativo alle specie ittiche principali di una soltanto fra le più importanti aree di pesca.

Se non si tiene conto del valore delle risorse naturali la crescita economica viene sovrastimata. Effettuando un aggiustamento per il deprezzamento di queste voci (*curva in verde*), il quadro appare molto diverso per l'Indonesia come per altri paesi.

Perfino con questi metodi conservativi si vede come le prestazioni e le prospettive dell'economia costaricana siano state sostanzialmente sopravvalutate. Il tasso di formazione netta di capitale, una variabile critica per la crescita economica, fu in effetti molto inferiore a quello stimato. Il deprezzamento delle risorse naturali salì dal 26 per cento della formazione lorda di capitale del 1970 al 37 per cento nel 1989. Nel 1989 il sistema dei conti convenzionale sopravvalutò la formazione reale netta di capitale (che sottrae il deprezzamento del capitale artificiale e naturale dalla formazione lorda di capitale) di oltre il 70 per cento. Un sistema dei conti così ingannevole relativo a un processo economico talmente importante come la formazione di capitale è del tutto inutile ai fini dell'analisi, della pianificazione e della valutazione economica.

Le risorse naturali possono generare un reddito considerevole se opportunamente gestite. La loro perdita (come si può vedere in questa area distrutta della foresta pluviale brasiliana) dovrebbe essere registrata nel bilancio patrimoniale nazionale.

L'esperienza di altri paesi in via di sviluppo per i quali si è compilata una contabilità delle risorse naturali è del tutto analoga a quella della Costa Rica. Nelle Filippine, per esempio, fra il 1970 e il 1987 le perdite annue dovute alla deforestazione sono state in media del 3,3 per cento del prodotto interno lordo. Nel 1988 le perdite agricole nelle terre non paludose attribuibili all'erosione ammontarono a circa il 2,5 per cento del PIL. Inoltre, fatto ancor più preoccupante, l'erosione del suolo agrario danneggiò gli spartiacque del paese, riducendo la produzione degli impianti idroelettrici e interrompendo l'irrigazione delle risaie situate nei bassopiani. Questi effetti identificabili ammontarono a quasi il 5 per cento del PIL. Una volta riversatosi in mare, il suolo asportato danneggiò le scogliere coralline fonte di pesca a piccola scala. Verso il 1984 l'inquinamento, insieme con la pesca sconsiderata, annullò totalmente i profitti. Nonostante i conti economici nazionali indicassero una crescita progressiva del debito con l'estero, essi non recavano traccia della distruzione della capacità produttiva che rendeva sempre più improbabile la restituzione di quel debito.

La contabilità delle risorse naturali dell'Indonesia mostra che tra il 1977 e il 1984 la riduzione del loro valore ammontò al 19 per cento del PIL. La diminuzione annua del 4 per cento del valore della fertilità del suolo è per esempio circa uguale all'aumento annuo di produzione agricola e questo fa pensare che gli attuali aumenti nella resa delle aziende agricole nazionali degli altopiani siano ottenuti quasi interamente a spese della futura produzione. Ancora una volta, i metodi di contabilità convenzionali non recano traccia di questo imminente pericolo.

Un numero sempre maggiore di paesi dipendenti dalle risorse naturali si sta rendendo conto dell'inadeguatezza degli attuali sistemi di contabilità nazionale. Gli analisti hanno cominciato a compilare bilanci nazionali delle risorse naturali, in base allo stesso schema adottato per la Costa Rica, per molti paesi: Messico, El Salvador, Bolivia, Brasile, Cile, Filippine, Indonesia, Cina, Malaysia, India e anche altri. In alcuni di questi paesi partecipano attivamente al progetto i servizi statistici nazionali e le agenzie ambientaliste del luogo. Da parte di gruppi di economisti si sta organizzando questo tipo di contabilità anche in paesi sviluppati come Norvegia, Canada, Australia, Francia, Germania, Paesi Bassi e Stati Uniti.

L'importanza di disporre di un sistema di conti che integri accuratamente ed efficacemente i valori economici e quelli ambientali è stata più volte sottolineata da molti leader mondiali. Il Congresso degli Stati Uniti ha istruito i rappresentanti degli Stati Uniti alle Nazioni Unite e le banche di sviluppo multilaterali affinché facciano pressione in favore di questi cambiamenti nel sistema standard di contabilità nazionale; inoltre ha dato istruzioni all'Agency for International Development degli Stati Uniti di appoggiare i paesi che si sforzano di istituire una contabilità delle risorse naturali.

Al centro di questo impegno vi sono la Statistical Commission e lo Statistical Office delle Nazioni Unite, che stanno revisionando il System of National Accounts. Inoltre, gli ex paesi comunisti e altri, compresi gli Stati Uniti, stanno ora uniformando i loro sistemi di contabilità nazionale allo SNA.

Attualmente, però, i responsabili dei servizi statistici delle Nazioni Unite stanno adottando nei confronti del problema della contabilità delle risorse naturali un atteggiamento equivoco. Si sono rifiutati di correggere l'incoerenza fondamentale nel trattamento riservato alle risorse naturali previsto nello SNA, mentre si sono limitati a mettere a punto, come aggiunta alle definizioni ufficiali, dei criteri-guida che i paesi possono seguire per compilare i conti delle risorse naturali.

È improbabile che questa posizione ambigua sia di aiuto. Questi conti aggiuntivi, se anche verranno compilati, non attireranno l'attenzione dell'opinione pubblica e dei politici come invece fanno le ben note voci del prodotto interno lordo, del reddito e degli investimenti nazionali. Queste voci, con tutte le loro distorsioni e incongruenze, con-

tinueranno a essere i punti principali in base ai quali si valuteranno e si analizzeranno le prestazioni economiche. Inoltre, poiché in tutto il mondo i servizi statistici sono cronicamente scarsi di fondi, è improbabile che essi si assumano il compito di tenere regolarmente una contabilità delle risorse naturali finché queste non entreranno a far parte del sistema centrale.

Le autorità statistiche delle Nazioni Unite non dovrebbero perdere l'opportunità ora a portata di mano di effettuare cambiamenti già attesi da troppo tempo. In realtà la UN Conference on Environment and Development che ha avuto luogo nel luglio scorso a Rio de Janeiro sarebbe stata l'occasione ideale per annunciare un preciso calendario di innovazioni. Il lavoro fatto in Costa Rica e in altri paesi ha dimostrato che una contabilità realistica delle principali risorse di un paese può essere compilata con un costo modesto e usando solo i dati già disponibili. Si è anche dimostrato che una contabilità di questo tipo modifica drasticamente la valutazione delle prestazioni economiche dei paesi maggiormente dipendenti dalle risorse naturali, fornendo un indispensabile primo allarme di perdite economiche ed ecologiche.

Parrebbe che tre anni siano un lasso di tempo sufficiente a completare questa trasformazione. È difficile credere che paesi che hanno lavorato per 50 anni o più in sistemi economici marxisti-leninisti possano convertirsi al capitalismo in un tempo inferiore a quello in cui le Nazioni Unite potrebbe cambiare la definizione di deprezzamento del capitale. La Conferenza di Rio non è riuscita a ottenere risultati tangibili a beneficio dell'ambiente globale. La correzione del sistema di contabilità nazionale è un risultato a portata di mano che sul lungo termine avrebbe un'enorme importanza.

BIBLIOGRAFIA

PEARCE DAVID, MARKANDYA ANIL e BARBIER EDWARD, *Accounting for the Environment* in *Blueprint for a Green Economy*, London, Earthscan Publications, 1989.

AHMAD YUSUF, EL SERAFY SALAH e LUTZ ERNST (a cura), *Environmental Accounting and Sustainable Development: A UNEP-World Bank Symposium*, World Bank, 1989.

REPETTO R. e altri, *Wasting Assets: Natural Resources in the National Income Accounts*, World Resources Institute, 1989.

MÄLER KARL-GÖRAN, *National Accounts and Environmental Resources* in «Environmental and Resource Economics», 1, n. 1, Kluwer Academic Publishers, 1991.

La lipoproteina(a) e le cardiopatie

Questa proteina che trasporta il colesterolo e si lega ai trombi ematici può aumentare il rischio di infarto miocardico; un confronto con le altre proteine del sangue potrebbe spiegarne il meccanismo d'azione

di Richard M. Lawn

La cardiopatia coronarica è la principale causa di morte negli Stati Uniti e in molti altri paesi dell'Occidente industrializzato. La maggior parte dei casi di cardiopatia coronarica ha alla base una grave patologia dei vasi: l'aterosclerosi, ossia l'accumulo di depositi lipidici sulle pareti delle arterie. Via via che queste placche aterosclerotiche si accumulano, possono indurre la formazione di trombi in grado di ostacolare il flusso ematico; se a essere ostruita è una delle arterie coronarie che irrorano il muscolo cardiaco, il risultato è un infarto miocardico.

Alcune cause dell'aterosclerosi e della cardiopatia coronarica sono ormai ben note: pressione sanguigna elevata, diabete, fumo e altri fattori sembrano favorire l'insorgenza precoce di cardiopatia coronarica. È noto che una dieta ricca di colesterolo e di grassi saturi contribuisce all'innalzamento del livello di lipidi nel sangue e allo sviluppo dell'aterosclerosi. Anche il patrimonio genetico dell'individuo ha un suo ruolo: è stato osservato che alcune persone possono assumere enormi quantità di grassi alimentari per lunghi periodi di tempo senza manifestare livelli elevati di colesterolo nel sangue, e molti, pur avendo livelli di colesterolo straordinariamente alti, non soffrono mai di cardiopatia coronarica. Con profondo sconcerto sia dei medici sia dei pazienti, l'infarto miocardico può invece colpire anche individui apparentemente a basso rischio.

La recente scoperta di una particella del sangue che sembra in gran parte responsabile del rischio di cardiopatia coronarica non attribuibile ad altri fattori ha quindi suscitato grandissimo interesse. Questa particella è la lipoproteina(a), un agglomerato di proteine, colesterolo e altri lipidi eccezionalmente abbondante nel sangue di molti individui la cui vulnerabilità alla cardiopatia coronarica non può essere ricondotta ad altre cause. Un cambiamento nell'alimentazione e altre misure che possono ridurre la maggior parte dei fattori di rischio non hanno alcun effetto sui livelli di lipoproteina(a). Non si sa ancora esattamente in che modo questa sostanza svolga la sua azione; i risultati preliminari di studi genetici e biochimici fanno pensare che, almeno in parte, l'aterosclerosi e l'infarto possano essere effetti collaterali nocivi dell'attività della particella nella rigenerazione di vasi sanguigni danneggiati.

Un fattore chiave per comprendere l'azione della lipoproteina(a) e l'aterosclerosi è il sistema che regola l'assunzione, la sintesi e la distribuzione dei lipidi nell'organismo. Le sostanze grasse, che non portano cariche elettrostatiche, tendono a essere insolubili in soluzioni acquose come il sangue. L'organismo rimedia a questo inconveniente grazie a una serie di particelle che racchiudono il colesterolo e gli altri lipidi e li rivestono di gruppi dotati di carica per facilitarne il trasporto. Queste particelle, le lipoproteine, sono costituite da molecole lipidiche neutre, simili a quelle dei detergenti, e da componenti proteiche dette apolipoproteine.

Nel sangue umano la principale particella addetta al trasporto del colesterolo è la lipoproteina a bassa densità (LDL), composta da circa 2000 molecole di colesterolo, 1000 molecole di fosfolipidi e una grande proteina di superficie, l'apolipoproteina B-100. È ormai assodato che elevati livelli di LDL sono un fattore di rischio per la cardiopatia coronarica, tanto che molti esperti definiscono questa sostanza «colesterolo cattivo». Per contrasto, il «colesterolo buono» è quello delle lipoproteine ad alta densità (HDL), il cui livello nel sangue è inversamente proporzionale al rischio di cardiopatia coronarica.

Nonostante la sua cattiva fama, la LDL ha un ruolo fondamentale per il trasporto di colesterolo nel sangue. Il colesterolo è un componente essenziale di tutte le membrane cellulari e viene utilizzato nelle ghiandole surrenali e nelle gonadi per la sintesi di ormoni steroidei, come il testosterone. Per ottenere il colesterolo, le cellule estraggono la lipoproteina a bassa densità dal sangue utilizzando i recettori della LDL, che si legano alla apolipoproteina B-100 sulla superficie della lipoproteina.

Michael S. Brown e Joseph L. Goldstein dell'Health Science Center dell'Università del Texas a Dallas hanno ricevuto il Premio Nobel nel 1985 per aver chiarito il metabolismo della LDL (si veda l'articolo *Recettori della LDL, colesterolo e aterosclerosi* di Michael S. Brown e Joseph L. Goldstein in «Le Scienze» n. 197, gennaio 1985). Essi hanno scoperto che un deficit di origine genetica di recettori della LDL (presente in circa una persona su 500) porta a elevati livelli ematici di colesterolo e a un aumento del rischio di cardiopatia coronarica. Una dieta ricca di colesterolo e di grassi saturi simulerebbe questo difetto in individui geneticamente normali, poiché segnala all'organismo di produrre un numero inferiore di recettori della LDL.

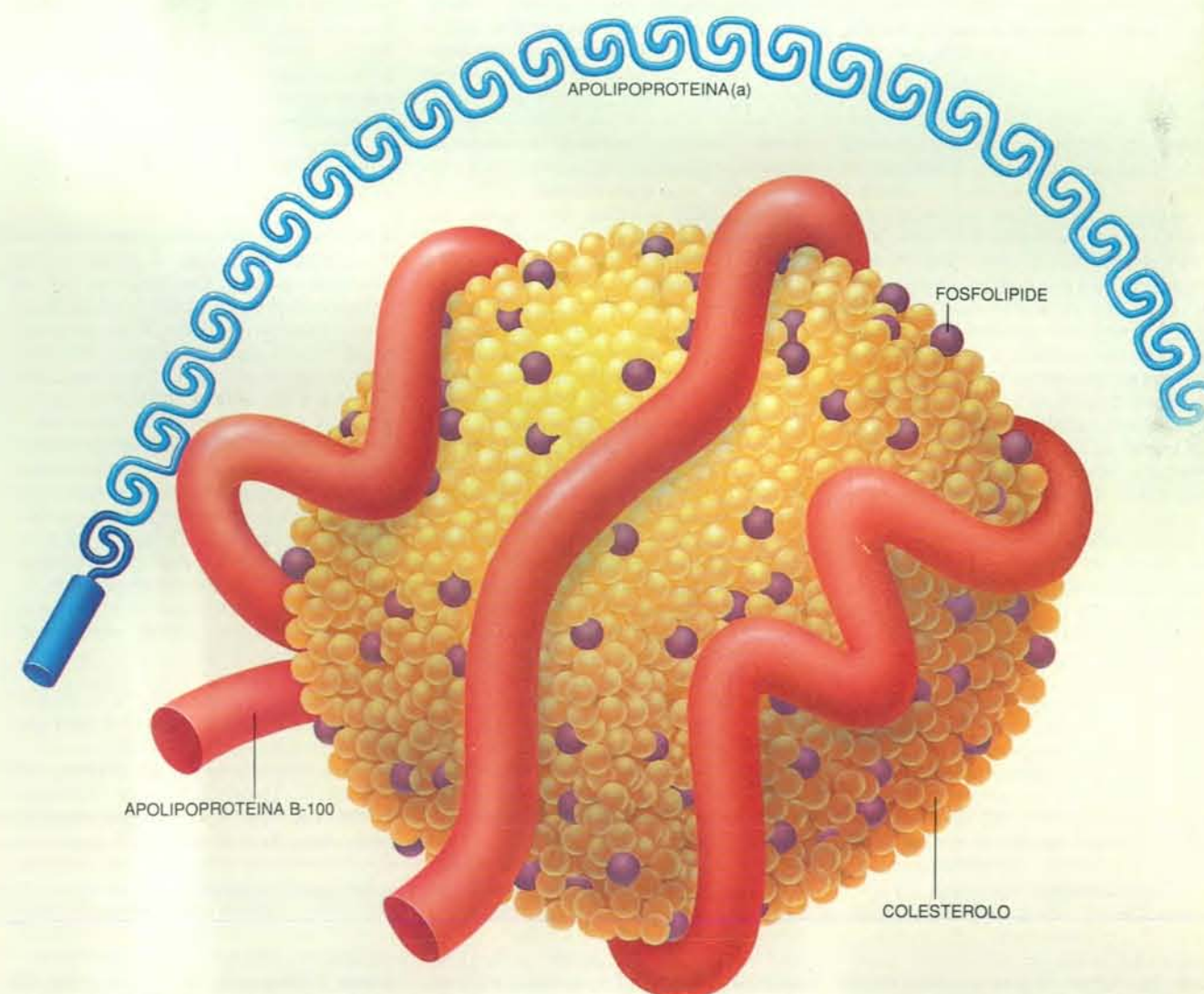
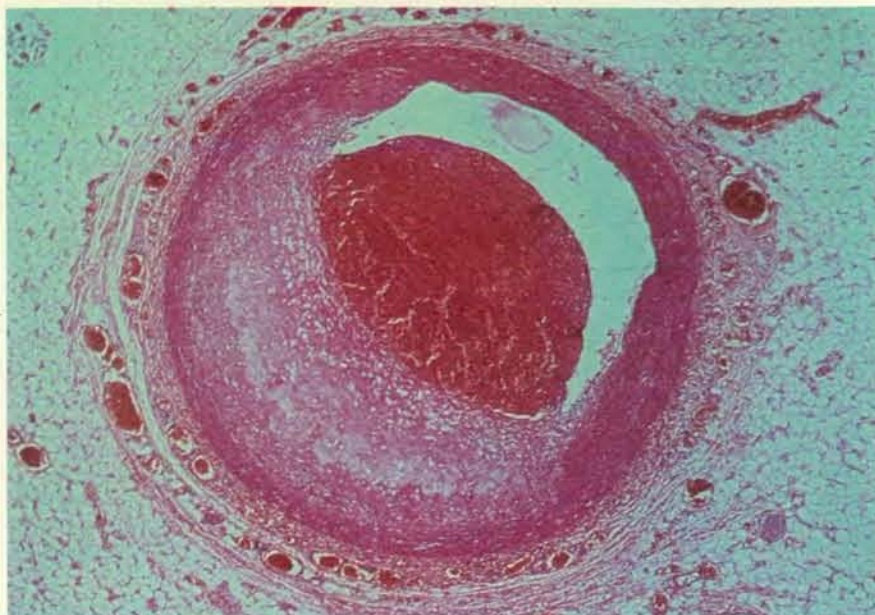
Questa risposta biochimica appare logica perché, in presenza di alte concentrazioni di colesterolo, le cellule dovrebbero ridurre la loro schiera di recettori per evitare di sovraccaricarsi di questa sostanza. Purtroppo una diminuzione del numero di recettori della LDL prolunga la permanenza in circolo delle particelle LDL, il che finisce per aumentare la probabilità che le particelle e il colesterolo che esse contengono vengano incorporati in placche aterosclerotiche. Al contrario della LDL, la lipoproteina ad alta densità non causa questi problemi, dato che favorisce il trasporto del colesterolo in eccesso da siti periferici al fegato, dove viene eliminato. Questi meccanismi contrastanti spiegano ragionevolmente l'associazione del rischio di cardiopatia coronarica ad alti livelli di LDL e bassi livelli di HDL.

Lo studio dell'LDL e delle molecole correlate ha condotto, circa trenta anni fa, alla scoperta della lipoproteina(a). All'inizio degli anni sessanta, Kåre Berg dell'Università di Oslo stava ricercando forme varianti delle beta-lipoproteine, la classe di molecole a cui appartiene la LDL. Grazie a metodi immunologici si erano già trovate variazioni, da individuo a individuo, in diverse altre proteine del sangue e sembrava plausibile che si potesse trattare di varianti della LDL dalle proprietà interessanti. Berg inoculò in conigli beta-lipoproteine estratte da diversi soggetti umani e poi analizzò le affinità degli anticorpi dei conigli così immunizzati.

Reazioni significative indicarono che alcuni degli anticorpi di coniglio riconoscevano una beta-lipoproteina presente in un terzo circa dei campioni umani; Berg la chiamò lipoproteina(a). Ulteriori studi rivelarono che la presenza di lipoproteina(a) era un carattere ereditario. In seguito, Berg, Gosta Dahlén dell'Ospedale Centrale di Boden, in Svezia, e collaboratori dimostrarono che l'incidenza dell'infarto miocardico era superiore negli individui portatori di lipoproteina(a) rispetto a una popolazione di controllo.

Quando si misero a punto test analitici più sensibili per misurare la concentrazione di lipoproteina(a), si comprese che questa sostanza è presente pressoché in tutti gli esseri umani, ma la sua concentrazione varia fino a 1000 volte da un individuo all'altro. La concentrazione di lipoproteina(a) rimane quasi stabile per tutta la vita di una persona, al contrario dei livelli di HDL e LDL, che possono variare enormemente in risposta all'alimentazione, all'esercizio fisico, all'età e all'assunzione di farmaci.

Molti esperimenti hanno confermato la correlazione positiva fra lipoproteina(a) e aterosclerosi. Mediante tecniche di estrazione chimica e anticorpi legati a coloranti, è stata rivelata la presenza di lipoproteina(a) nelle placche aterosclerotiche. Molti studi hanno anche dimostrato che elevati livelli di questa proteina sono associati all'infarto miocardico, all'ictus, al restringimento delle arterie e alle ostruzioni recidive dei vasi dopo interventi di *bypass* coronarico. Secondo alcuni studiosi, circa un quarto di tutti i casi di infarto miocardico che colpiscono uomini di età inferiore ai 60 anni si verifica in individui che hanno un'elevata concentrazione di lipoproteina(a) nel sangue per cause ereditarie. La componente genetica della cardiopatia coronarica che non è riconducibile ad alcuno dei fattori di rischio tradizionali va attribuita in massima parte a elevati livelli di lipoproteina(a).

Nell'ambito del Framingham Heart

La lipoproteina(a) è una particella del sangue la cui presenza in quantità elevate aumenta il rischio di cardiopatia coronarica. Una porzione della particella è costituita da fosfolipidi, colesterolo e apolipoproteina B-100 ed è molto simile alla lipoproteina a bassa densità (LDL) che trasporta il colesterolo. La parte rimanente, l'apolipoproteina(a), che è legata in un solo punto (*qui non rappresentato*) all'apolipoproteina B-100, conferisce all'aggregato le proprietà che lo caratterizzano.

Una placca aterosclerotica ostruisce quasi completamente questa arteria coronaria. I trombi associati a queste placche possono indurre infarto miocardico. La lipoproteina(a), che si deposita spesso nelle placche, sembra favorire l'aterosclerosi.

Study, che dal 1948 tiene sotto controllo le condizioni di salute di migliaia di persone, si è potuta valutare la situazione sanitaria dei familiari di persone colpite da infarto miocardico. Si è così concluso che un livello elevato di lipoproteina(a) è fra i più comuni fattori ereditari di rischio di infarto miocardico. Oltre a ciò, una data quantità di lipoproteina(a) nel sangue sembra aumentare il rischio in misura pari a una quantità dieci volte più elevata di LDL. La ricerca di Berg di una variante della LDL ha dunque messo in luce una lipoproteina dalle proprietà caratteristiche e, a quanto pare, pericolose.

La lipoproteina(a) si è rivelata molto simile per struttura alla LDL: contiene colesterolo, fosfolipidi e una molecola di apolipoproteina B-100. La sua caratteristica distintiva è la presenza di un'altra grande proteina, chiamata apolipoproteina(a), che è legata chimicamente all'apolipoproteina B-100. Un trattamento chimico che spezzi il legame fra le due proteine produce apolipoproteina(a) libera e una particella del tutto simile per aspetto e comportamento alla LDL. La struttura dell'apolipoproteina(a) è dunque la chiave per comprendere il caratteristico comportamento della lipoproteina(a).

Nel 1987 il mio gruppo della Genentech, in collaborazione con quello di Angelo M. Scanu dell'Università di Chicago, ha clonato il gene per la apolipoproteina(a) umana. In seguito siamo riusciti a determinare la sequenza di basi del suo DNA e a dedurre la sequenza di amminoacidi della proteina. Fortunatamente, la sequenza da noi trovata è quasi identica a quella di una proteina dalle proprietà ben conosciute: circa l'80 per cento degli amminoacidi dell'apolipoproteina(a) coincide con quelli del plasminogeno.

Il plasminogeno è il precursore di una proteasi (un enzima che catalizza l'idrolisi di altre proteine) il cui bersaglio è la fibrina, il principale componente proteico dei trombi ematici. Dato che il plasminogeno non è di per sé una proteasi attiva, può circolare nel sangue senza distruggere sistematicamente tutti i trombi. In condizioni appropriate, per esempio nel sito di ferite in via di guarigione, enzimi chiamati attivatori del plasminogeno alterano una parte della molecola del precursore e ne innescano l'attività di degradazione della fibrina.

La presenza o l'assenza di plasminogeno in un coagulo associato a una placca aterosclerotica potrebbe rappresentare la differenza fra la semplice rigenerazione del vaso danneggiato e un infarto miocardico in piena regola. In effetti, proprio perché il plasminogeno è fondamentale nel processo di guarigione, oggi ai pazienti colpiti da infarto miocardico vengono infusi attivatori del plasminogeno per accelerare la disgregazione dei coaguli.

È stata anche avanzata l'ipotesi che, a causa della sua somiglianza con il plasminogeno, l'apolipoproteina(a) possa rappresentare il legame a lungo cercato fra i livelli ematici di lipoproteine e l'incidenza di trombi. Per trovare una conferma si sono sistematicamente confrontate le proprietà dell'apolipoproteina(a) e del plasminogeno nella speranza di stabilire perché le due proteine siano così simili e in che modo questa somiglianza possa assumere un significato nella genesi dell'aterosclerosi e della cardiopatia coronarica.

La somiglianza tra apolipoproteina(a) e plasminogeno ha le sue radici in una forma di «economia» intrinseca nell'evoluzione delle proteine. Proteine nuove e utili non sono sempre costruite a partire da zero, con la combinazione fortuita di migliaia di basi azotate del DNA in un gene funzionale. È invece evidente che molte proteine vengono formate assemblando elementi evolutisi in precedenza. L'avvento di tecniche rapide per il sequenziamento di geni e molecole proteiche ha permesso di esaminare a fondo migliaia di sequenze. Quando i genetisti paragonano una nuova sequenza proteica con quelle già note contenute nelle banche di dati, è ormai la regola e non l'eccezione trovarvi somiglianze, o nell'intera molecola o in una parte di essa.

In base a queste omologie, o corrispondenze nella sequenza, i geni e le proteine che essi sintetizzano possono essere raggruppati in famiglie o superfamiglie. Alcuni membri di un gruppo possono condividere solo le poche componenti necessarie per far avvolgere le proteine approssimativamente nella stessa forma; altri possono essere quasi identici, al punto di avere differenze funzionali minime.

Per esempio, una delle prime famiglie geniche analizzate è costituita dai geni delle globine, che codificano per le subunità dell'emoglobina. Nell'uomo vi sono cinque geni omologhi per le globine, disposti in tandem su un cromosoma. Questo aggregato di geni si è probabilmente evoluto attraverso duplicazioni ripetute di parte di quel DNA cromosomico. Le copie in più del gene ancestrale delle globine sono state gradualmente soggette a mutazioni, e alcune si sono conservate a causa dei loro vantaggi funzionali. Le globine hanno sviluppato svariate specializzazioni: per esempio, alcune, che si legano più fortemente all'ossigeno, sono espresse solo durante lo sviluppo prenatale perché permettono all'emoglobina fetale di trarre ossigeno dal sangue materno.

In molti casi le proteine si evolvono attraverso lo scambio di parti di geni che costituiscono dominî, o moduli, funzionali (si veda l'articolo *Le proteine* di Russell F. Doolittle in «Le Scienze» n. 208, dicembre 1985). Nella maggior parte dei geni degli organismi complessi, le regioni che codificano per i dominî proteici sono separate da regioni non codificanti; la sintesi di una proteina comprende l'assemblaggio di questi dominî separati in una struttura completa mediante l'operazione di taglia-e-cuci di una proteina intermedia, l'RNA messaggero. Questa architettura genetica modulare facilita l'evoluzione delle proteine perché i geni possono scambiarsi dominî discreti che conferiscono determinate affinità di legame, attività enzimatiche o caratteristiche strutturali.

Il plasminogeno e l'apolipoproteina(a) fanno parte di una grande superfamiglia costituitasi mediante l'acquisizione e la perdita di moduli funzionali in duplicati di geni. Tutti i componenti della famiglia, che comprende una decina di proteine coinvolte nella coagulazione del sangue, hanno un dominio omologo alla tripsina, una proteasi dall'ampia attività che scinde le proteine contenute negli alimenti. L'omologia fa pensare che sia quelle proteine sia la tripsina si siano evolute da una proteina ancestrale comune. A parte il dominio omologo alla tripsina, alcune di queste proteine condividono anche altri moduli, sia con membri della stessa famiglia, sia con proteine prive di attività proteasica appartenenti ad altri gruppi. Confrontando le sequenze e contando i cambiamenti avvenuti dalla duplicazione di un gene o di un dominio genico, i biologi molecolari sono riusciti a ricostruire alberi genealogici che illustrano i possibili rapporti evolutivi fra le proteine.

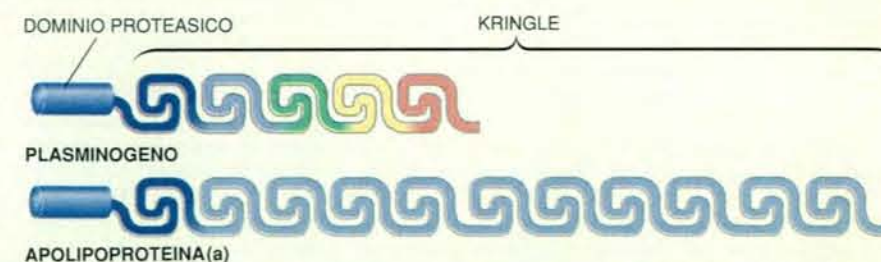
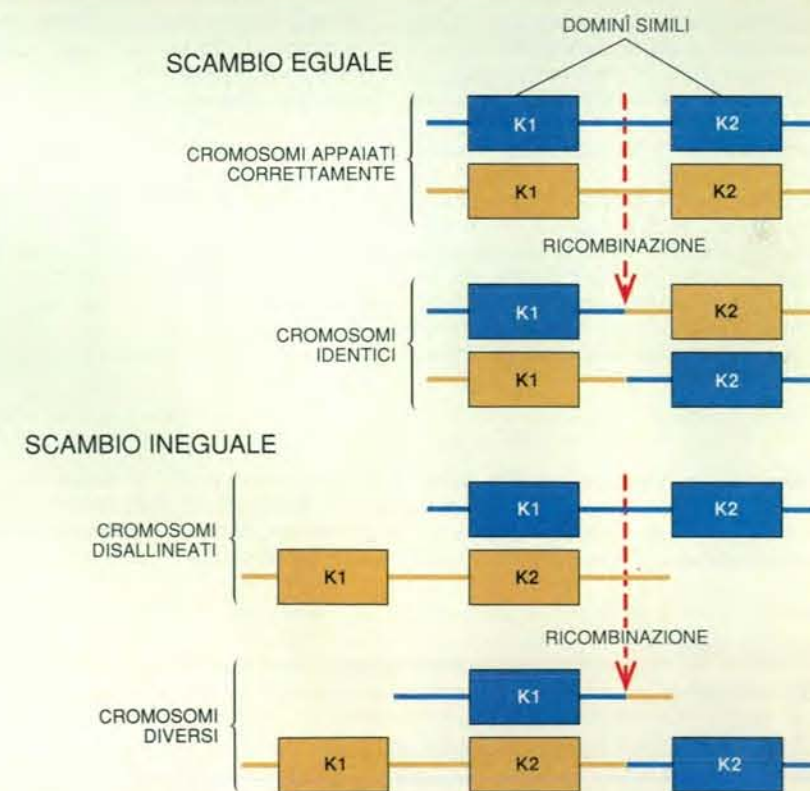
Oltre al dominio omologo per la tripsina, il plasminogeno ha cinque moduli chiamati *kringle*, strutture in cui le catene di amminoacidi sono interconnesse da tre legami disolfuro. (I moduli si chiamano così perché di solito vengono disegnati in una forma che fa pensare al biscotto danese dallo stesso nome.) Il motivo strutturale del kringle ricorre in diverse proteasi, oltre che in alcune proteine che non hanno funzioni catalitiche.

Ciascun kringle di una molecola di plasminogeno si distingue dagli altri. Alcuni contengono siti di legame per la fibrina e aiutano il plasminogeno a trovare il substrato più adatto per la digestione dei trombi. Uno ha un sito di legame per una proteina regolatrice che impedisce al plasminogeno attivato di agire indiscriminatamente.

Le sequenze del plasminogeno e della apolipoproteina(a) corrispondono strettamente a un'estremità, ma poi vi è un'interruzione nell'omologia: l'apolipoproteina(a) manca delle parti che corrispondono ai kringle 1, 2 e 3 e alla cosiddetta regione di preattivazione del plasminogeno. Invece l'apolipoproteina(a) ha versioni multiple di un dominio che assomiglia al kringle 4 del plasminogeno; nel gene per l'apolipoproteina(a) da noi clonato nel 1987, questo kringle è ripetuto più di 30 volte.

È facile immaginare come l'apolipoproteina(a) si sia evoluta in diverse fasi a partire dalla duplicazione del gene per il plasminogeno (o di un gene che è stato il precursore comune di entrambi). Alcuni segmenti del gene, che codificavano per certe parti del plasminogeno, fra cui i kringle 1, 2 e 3, sono stati eliminati. Svariate mutazioni hanno portato a sostituzioni di amminoacidi che hanno alterato le caratteristiche funzionali dei rimanenti dominî proteici. Successive fasi di duplicazione della sequenza hanno prodotto le numerose copie della regione che codifica per il kringle 4.

Come ha osservato da Gerd Utermann dell'Università di Innsbruck, le dimensioni dell'apolipoproteina(a) variano notevolmente da un individuo all'altro. Diversi gruppi hanno stabilito che queste differenze derivano quasi interamente da variazioni nel numero di dominî kringle ripetuti. Il gene per l'apolipoproteina(a) clonato inizialmente, che aveva 37 kringle ripetuti, è risultato essere una fra le più grandi varianti comuni.

L'alto grado di omologia fra le copie del kringle 4 incuriosisce molto. Diverse proteine contengono dominî ripetuti al loro interno, ma le copie tendono a differire notevolmente via via che si accumulano le mutazioni. I cinque kringle del plasminogeno, per esempio, erano probabilmente molto simili tra loro all'inizio, ma ora differiscono in circa 70 dei loro 114 amminoacidi. Invece, oltre 20 dei dominî kringle ripetuti dell'apolipoproteina(a) sono identici in tutti i loro amminoacidi e in tutte le 342 rispettive

I dominî *kringle* e altre somiglianze fra l'apolipoproteina(a) e il plasminogeno, una proteina del sangue che dissolve i coaguli, fanno pensare che le due molecole siano strettamente correlate. L'apolipoproteina(a) manca di tre dei dominî kringle presenti nel plasminogeno. Altri due dominî kringle e un dominio proteasico appaiono in entrambe le proteine; l'apolipoproteina(a) possiede da 10 a 40 copie di kringle.

Lo scambio di DNA tra i cromosomi durante la divisione meiotica può produrre molteplici copie di sequenze geniche, come quelle che costituiscono i kringle dell'apolipoproteina(a). Di solito i geni corrispondenti sui cromosomi appaiati si allineano perfettamente e si scambiano uguali quantità di DNA. Se due sequenze di un filamento sono simili, però, la prima copia di un cromosoma può appaiarsi con la seconda copia dell'altro, causando un allineamento difettoso. La ricombinazione diseguale che ne risulta produce un cromosoma fornito di una sequenza in più.

basi azotate del DNA. Molti kringle sono stati perciò probabilmente aggiunti al gene assai di recente, con un processo denominato ricombinazione omologa «fuori registro».

La ricombinazione si ha durante la meiosi, ossia il processo di divisione cellulare che produce i gameti, quando i cromosomi appaiati sono mantenuti nel loro esatto allineamento dalle sequenze corrispondenti di DNA. La rottura e la ricongiunzione dei filamenti di DNA, o altri processi enzimatici che danno lo stesso risultato, normalmente scambiano parti di un cromosoma con quelle del suo partner. Il processo di ricombinazione omologa conserva la struttura generale di ciascun cromosoma. Se però i cromosomi contengono sequenze ripetute, si può avere un allineamento difettoso: la prima sequenza ripetuta di un cromosoma può appaiarsi con la seconda sequenza dell'altro cromosoma. La ricombinazione fra i cromosomi fuori registro produce allora un cromosoma con una copia in più del dominio ripetuto e uno con la rispettiva delezione. Questo meccanismo casuale fornisce una spiegazione verosimile delle notevoli differenze ereditarie nelle dimensioni delle molecole di apolipoproteina(a).

Partendo da ipotesi sulla velocità di accumulo delle mutazioni nel DNA, alcuni studiosi hanno stimato che le sequenze dell'apolipoproteina(a) e del plasminogeno abbiano cominciato a divergere solo circa 40 milioni di anni fa. Questa data corrisponde alla separazione fra le scimmie del Vecchio Mondo e quelle del Nuovo Mondo. A conferma di queste scoperte, le prime indagini per trovare l'apolipoproteina(a) in varie specie animali ebbero esito positivo solo nelle scimmie del Vecchio Mondo, nelle grandi scimmie antropomorfe e nell'uomo. Questa conclusione affascinò gli studiosi interessati all'evoluzione molecolare, ma fu una delusione per coloro che speravano di studiare i meccanismi dell'aterosclerosi nei roditori e in altri piccoli animali di laboratorio.

Nel 1988, tuttavia, P. M. Laplaud del Laboratorio di biochimica medica di Limoges, in Francia, ha trovato livelli elevati di una proteina simile all'apolipoproteina(a) umana nel riccio europeo. Questo insettivoro è solo lontanamente imparentato con l'uomo, dato che la sua linea di discendenza ha iniziato a divergere da quella dei nostri antenati circa 80 milioni di anni fa. Questa scoperta rimette in questione la storia dell'apolipoproteina(a); l'ulteriore clonazione e sequenziamento dei geni per l'apolipoproteina(a) di diverse specie potrebbe risolvere l'enigma della loro origine.

La sequenza della apolipoproteina(a) fornisce indizi molto interessanti sul ruolo fisiologico normale della proteina e sul suo contributo all'induzione dell'aterosclerosi. Un'ipotesi attraente è che la lipoproteina(a) contribuisca alla riparazione dei danni ai vasi sanguigni. Quando un vaso è lacerato o forato, coaguli ricchi di fibrina bloccano temporaneamente la fuoriuscita di sangue. La guarigione, tuttavia, dipende dalla crescita di nuove cellule, che hanno bisogno di colesterolo come componente della loro membrana.

Per la somiglianza con il plasminogeno l'apolipoproteina(a) potrebbe verosimilmente offrire un vantaggio selettivo nella guarigione delle ferite. Se la proteina mantenesse la capacità di legame con la fibrina del plasminogeno non attivato, contribuirebbe a trasportare il colesterolo al posto giusto nel momento giusto. Questo ruolo vantaggioso dell'apolipoproteina(a) non dovrebbe essere incompatibile con i suoi effetti patologici: la proteina potrebbe essersi evoluta in un'epoca in cui i primati nostri predecessori avevano livelli ematici di colesterolo molto più bassi degli esseri umani moderni, che consumano molti alimenti ricchi di lipidi. Inoltre, la selezione naturale non avrebbe avuto bisogno di tenere conto del nostro attuale desiderio di evitare la morte per infarto miocardico alla «veneranda» età di 40 anni.

I tentativi di confermare questa e altre ipotesi correlate hanno dato risultati ambigui. I primi studi indicavano che l'apolipoproteina(a) si legava alla fibrina meno efficacemente del plasminogeno. Più di recente, però, il gruppo di Peter Harpel alla Cornell University e diversi altri laboratori hanno scoperto che la parziale degradazione di un coagulo di fibrina porta allo scoperto siti che si legano efficacemente all'apolipoproteina(a). Questi siti contribuirebbero ad associare la lipoproteina(a) con il coagulo nello stadio del processo di guarigione in cui il coagulo stesso comincia a dissolversi. Come hanno dimostrato vari gruppi di ricerca, alcune molecole della parete vasale, fra cui componenti della matrice extracellulare (come elastina, fibronectina, collagene e glicosamminoglicani) si legano alla lipoproteina(a) più facilmente che non alla LDL. Questi risultati indicano che la lipoproteina(a) potrebbe essere in grado di contribuire alla guarigione delle ferite, pur promuovendo l'aterosclerosi qualora sia presente in eccesso.

Un altro modo in cui la lipoproteina(a) potrebbe raggiungere la parete di un vaso è quello di farsi trasportare dai macrofagi. Queste cellule del sistema immunitario hanno il compito di eliminare residui microscopici dell'organismo. Le loro caratteristiche specializzate permettono loro di ingerire microrganismi invasori, frammenti di cellule morte e particelle tossiche, fra cui lipidi e proteine ossidati da reazioni chimiche nei tessuti.

Tuttavia i macrofagi possono avere effetti dannosi. Se si sovraccaricano di LDL ossidata, non possono più fungere da «spazzini» e diventano cellule spugnose ricche di lipidi. Queste possono insinuarsi nella parete vasale e liberare fattori di crescita che promuovono la proliferazione cellulare, contribuendo a ispessire la parete arteriosa. La lipoproteina(a), specie in forma ossidata, può aderire ai macrofagi promuovendone la trasformazione in cellule spugnose.

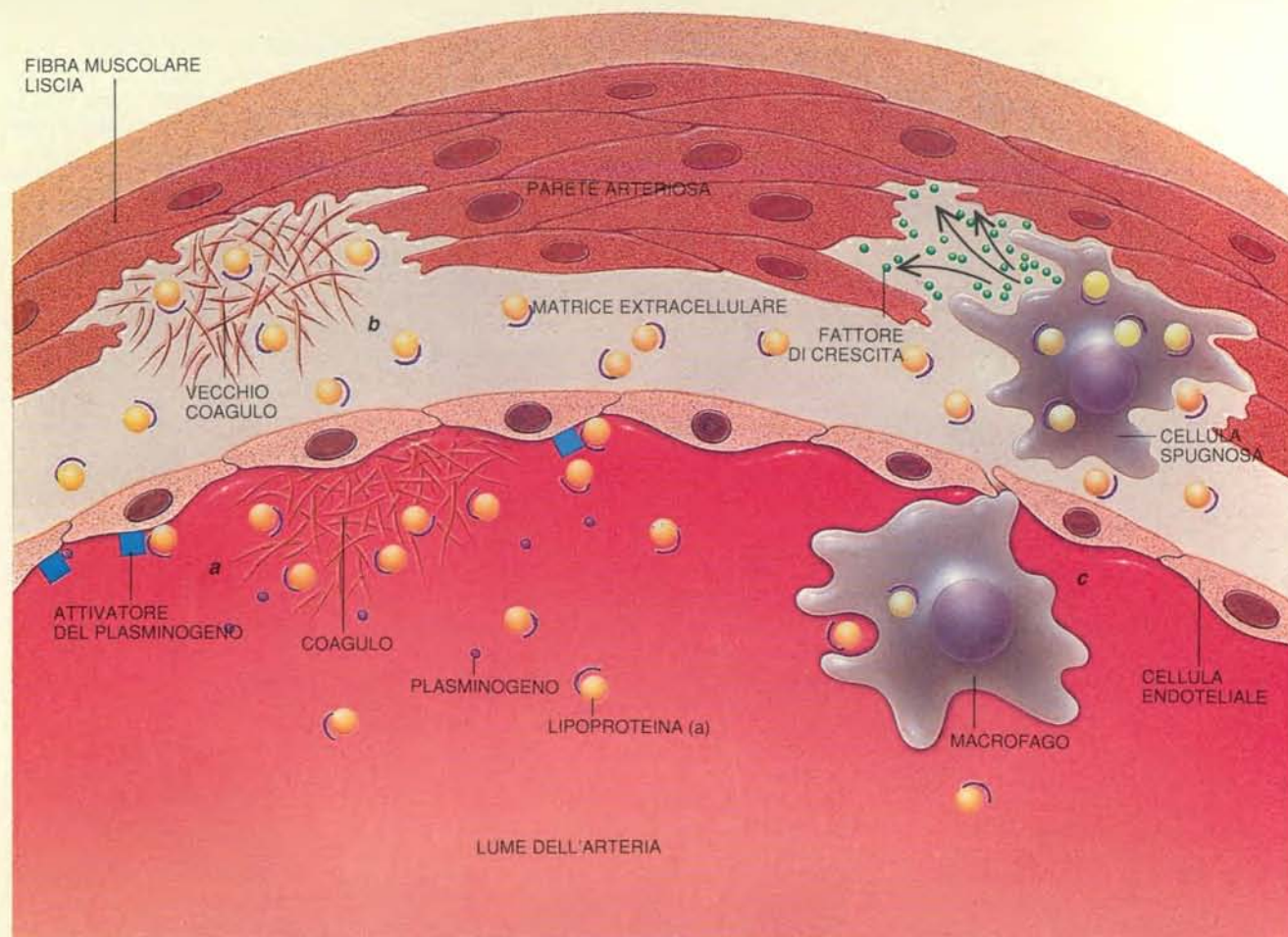
La lipoproteina(a) può avere anche un effetto più diretto nel favorire la crescita di placche aterosclerotiche. Due gruppi di ricerca giapponesi hanno di recente caratterizzato una proteina, il fattore di crescita degli epatociti, che stimola la proliferazione di molti tipi di cellule. Assomiglia anch'essa al plasminogeno nella sequenza di amminoacidi, sia pure non tanto quanto l'apolipoproteina(a). Se quest'ultima è in grado di promuovere la divisione cellulare come fa il fattore di crescita degli epatociti, potrebbe causare la proliferazione aterosclerotica delle cellule nella parete del vaso.

L'apolipoproteina(a) può anche indurre cardiopatia coronarica contribuendo al mantenimento dei trombi. Oltre ad avere un ruolo decisivo nello scatenare l'infarto miocardico, questi ultimi possono anche prender parte al graduale ispessimento della parete dell'arteria che precede l'evento patologico. Alcuni studiosi ritengono che nell'arco di vita di un vaso sanguigno possa accadere che microscopici coaguli si formino e si dissolvano più volte. Questi coaguli possono sovente lasciare residui che vengono incorporati nel vaso ogni volta che questo subisce un processo di riparazione. I depositi così formati possono fungere da segnali per la crescita cellulare durante la guarigione delle lesioni.

Qualunque fattore porti a un incremento della formazione di coaguli o ne impedisca la dissoluzione può quindi avere un duplice ruolo nell'induzione di un infarto miocardico. L'apolipoproteina(a) non è in grado di dissolvere la fibrina, come invece può fare il plasminogeno attivato, e tuttavia, a causa della sua somiglianza con quest'ultimo, può intralciarne l'azione. Si è scoperto che, in certe condizioni sperimentali, l'apolipoproteina(a) può competere con il plasminogeno per l'accesso alla fibrina, ai siti di legame sulla superficie cellulare e agli attivatori del plasminogeno. Tutte queste attività concorrenziali possono impedire al plasminogeno di svolgere la propria azione in modo ottimale e sconvolgere il delicato equilibrio fra formazione e degradazione dei trombi.

Questa ipotesi fornisce una spiegazione soddisfacente del legame fra livelli elevati di lipoproteina(a) e cardiopatia coronarica, ma è necessaria una certa cautela. La competizione fra plasminogeno e apolipoproteina(a) sembra non si verifichi in certe condizioni, anche fisiologiche. Inoltre la quantità di plasminogeno in circolo è molto superiore a quella di apolipoproteina(a), sicché l'effetto della competizione potrebbe essere poco rilevante. Tuttavia, anche un lieve aumento del tempo necessario per dissolvere un coagulo potrebbe influire in modo cruciale sul decorso di una malattia - come l'aterosclerosi - che pure impiega anni a manifestarsi. La possibilità che l'apolipoproteina(a) inibisca la distruzione dei coaguli è ancora un campo interessante per future indagini.

Esperimenti per verificare tutte queste ipotesi sono in corso, ma sono complicati dalla difficoltà di ricreare in laboratorio tutte le componenti di un'arteria umana. Un metodo promettente per chiarire il ruolo dell'apolipoproteina(a) nell'aterosclerosi è quello di ottenere animali transgenici adatti. Dovrebbe essere possibile inserire il gene per l'apolipoproteina(a) umana in animali da esperimento in modo da indurli a esprimere grandi quantità di questa proteina nel sangue. Se una specie normalmente priva di apolipoproteina(a) presentasse una maggiore suscettibilità alla formazione di placche in presenza del gene umano, si potrebbe dimostrare una relazione causa-effetto fra l'apolipoproteina(a) e la cardiopatia coronarica. Gli animali transgenici potrebbero allora fungere da buoni modelli dello sviluppo dell'aterosclerosi nell'uomo. Recenti risultati indicano in effetti che topi transgenici che possiedono il gene umano per l'apolipoproteina(a) sono più suscettibili allo sviluppo dell'aterosclerosi.

Questo albero genealogico delle proteine propone una ricostruzione ipotetica e semplificata dei rapporti evolutivi all'interno di un ampio gruppo di molecole comprendente l'apolipoproteina(a) e il plasminogeno. Tutte le proteine discendono da un'unica proteasi ancestrale. Le nuove molecole vengono ottenute per addizione, delezione o duplicazione dei dominî funzionali delle proteine e, anche, per graduale accumulo di sostituzioni amminoacidiche per mutazione (*non mostrato*).

La lipoproteina(a) favorisce la cardiopatia coronarica attraverso diversi possibili meccanismi. Competendo con il plasminogeno per i siti di legame sui coaguli sanguigni e sugli enzimi attivatori del plasminogeno (*a*) può rallentare la distruzione dei trombi che spesso provocano infarto miocardico. I residui di vecchi coaguli nella parete arteriosa e la lipoproteina(a) legata alla matrice extracellulare possono far proliferare eccessivamente le cellule che rivestono le arterie (*b*). I macrofagi che inglobano troppa lipoproteina(a) diventano spugnosi e liberano fattori di crescita che promuovono l'aterosclerosi (*c*).

Mentre gli studiosi stanno chiarendo gli intricati rapporti tra lipoproteina(a) e aterosclerosi, che cosa si può fare per quella percentuale della popolazione che possiede alti livelli ereditari di questa proteina ed è quindi a rischio di cardiopatia coronarica? Un primo passo auspicabile sarebbe quello di identificare queste persone tramite uno *screening* di massa dei livelli di lipoproteina(a). Attualmente solo i centri di ricerca e alcuni grandi ospedali sono attrezzati per condurre questo tipo di saggio, ma la disponibilità di questa analisi è probabilmente destinata ad ampliarsi.

Controlli effettuati su pazienti che soffrono di cardiopatia coronarica in assenza di altri fattori di rischio potrebbero dimostrarsi utili per identificare i soggetti che presentano livelli elevati di lipoproteina(a). Inoltre, trattandosi di un carattere ereditario, sarebbe prudente sottoporre ad analisi i parenti stretti delle persone con alti livelli di lipoproteina(a) e di coloro che sono stati colpiti da cardiopatia coronarica in età precoce.

Per quanto riguarda la terapia, la dieta e il trattamento con farmaci possono ridurre i livelli di LDL e il rischio di infarto miocardico, ma hanno un effetto molto più ridotto sulla lipoproteina(a). In una delle più chiare dimostrazioni della scarsa rilevanza dell'alimentazione, Scanu e collaboratori hanno somministrato a scimmie reso prima una dieta povera di grassi e poi una estremamente ricca di grassi, osservando un aumento di quasi 10 volte del livello di LDL e una variazione minima del livello di lipoproteina(a). Fra tutti i farmaci disponibili per ridurre il colesterolo nel sangue, solo la niacina in dosi elevate sembra avere qualche effetto sulla lipoproteina(a); il fenomeno però non si verifica in tutti i casi e molti pazienti presentano una scarsa tolleranza per alti dosaggi di niacina.

Oggi il tipo d'intervento più saggio sembra quello di agire laddove è possibile. Poiché i fattori di rischio per la cardiopatia coronarica sono di solito cumulativi, gli individui con livelli elevati di lipoproteina(a) farebbero bene a controllare gli altri fattori di rischio noti, come il colesterolo LDL, il fumo, l'ipertensione e l'obesità. Possono consolarsi sapendo che molte persone con alti livelli di lipoproteina(a) non manifestano mai cardiopatia coronarica e che, in certe parti del mondo in cui gli altri fattori predisponenti hanno scarsa rilevanza, l'aterosclerosi è una malattia rara.

BIBLIOGRAFIA

SCANU ANGELO M. (a cura), *Lipoprotein(a)*, Academic Press, 1990.

SCANU ANGELO M. e FLESS GUNTHER M., *Lipoprotein(a): Heterogeneity and Biological Relevance* in «Journal of Clinical Investigation», 85, n. 6, giugno 1990.

PATTHY LÁSZLÓ, *Modular Exchange Principles in Proteins* in «Current Opinion in Structural Biology», 1, n. 3, giugno 1991.

SCANU A., LAWN R. e BERG K., *Lipoprotein(a) and Atherosclerosis* in «Annals of Internal Medicine», 115, n. 3, 1 agosto 1991.

Modelli per la dispersione degli inquinanti in atmosfera

La simulazione accurata del comportamento di gas e polveri immessi in atmosfera consente di fare previsioni sul loro impatto ambientale utilizzando al meglio i dati rilevati dai nuovi strumenti meteorologici

di Domenico Anfossi, Giuseppe Brusasca ed Enrico Ferrero

L'inquinamento atmosferico è dovuto sia a cause naturali sia all'attività antropica; mentre però l'inquinamento «naturale» può, a grandi linee, considerarsi costante nel tempo, quello dovuto all'attività umana, in primo luogo alle attività industriali, al riscaldamento domestico e ai trasporti, è in continuo aumento.

Inoltre, sebbene l'inquinamento da cause naturali sia di grandi proporzioni (per esempio l'Etna emette in atmosfera una quantità di anidride solforosa equivalente a quella che producono circa 10 grandi centrali termoelettriche alimentate a olio combustibile), sulle sue cause non si può in generale intervenire, mentre ciò è o dovrebbe essere possibile su quelle dell'inquinamento antropico.

Comune è comunque la necessità di studiare e di capire le modalità di dispersione in atmosfera del materiale inquinante per prevedere le possibili conseguenze del suo impatto sui diversi ecosistemi.

Sono sotto gli occhi di tutti i problemi che l'inquinamento sta creando all'equilibrio ecologico della Terra: i gas e le polveri liberati nell'atmosfera provocano effetti negativi sia nelle vicinanze delle sorgenti (deterioramento della qualità della vita in siti urbani, agricoli e industriali), sia a media e a grande distanza (piogge acide, trasporto transfrontaliero) sia a scala globale (effetto serra, buco dell'ozono).

Esempi talora drammatici quali l'aumento significativo della mortalità nelle città densamente popolate, come Londra e New York, durante periodi di calma di vento e inversione termica, incidenti in impianti nucleari (Three Miles Island, Chernobyl) o chimici (Seveso, Bhopal), l'incendio dei pozzi petroliferi durante la recente guerra del Golfo, dimostrano la necessità di disporre di metodologie attendibili per la previsione di rischi ambientali che si possono verificare sia per una condizione meteorologica avversa sia per una liberazione accidentale di sostanze pericolose.

Le conoscenze attuali sono ancora lontane dall'essere pienamente soddisfacenti: oltre al limite fondamentale di una non completa descrizione del fenomeno della turbolenza atmosferica, tutto è reso più complesso dall'interazione tra le diverse scale temporali e spaziali alle quali si riferiscono i fenomeni atmosferici: si passa da poche decine di metri e qualche secondo (come nel caso, per esempio, della turbolenza generata da un ostacolo) alle migliaia di chilometri e diversi giorni (nello studio, per esempio, di un passaggio di un fronte atmosferico).

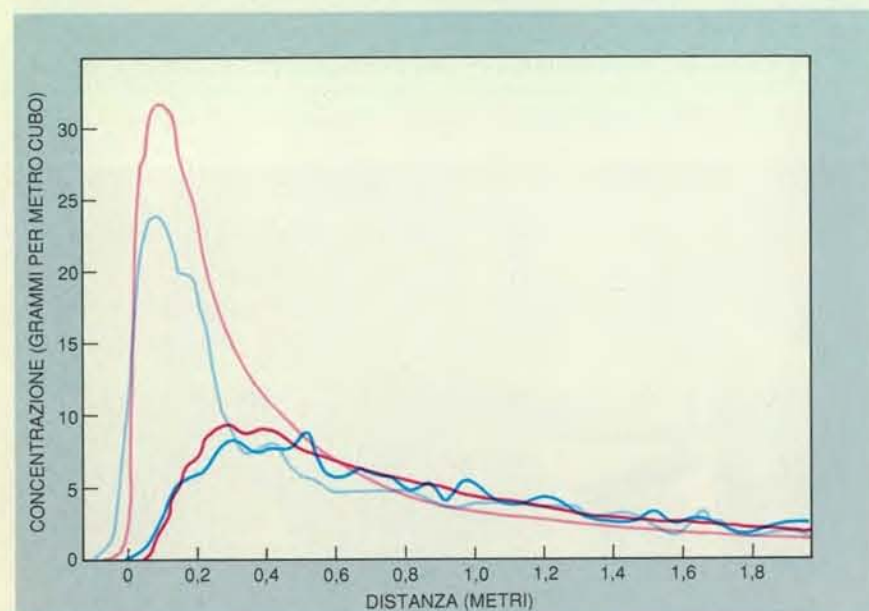
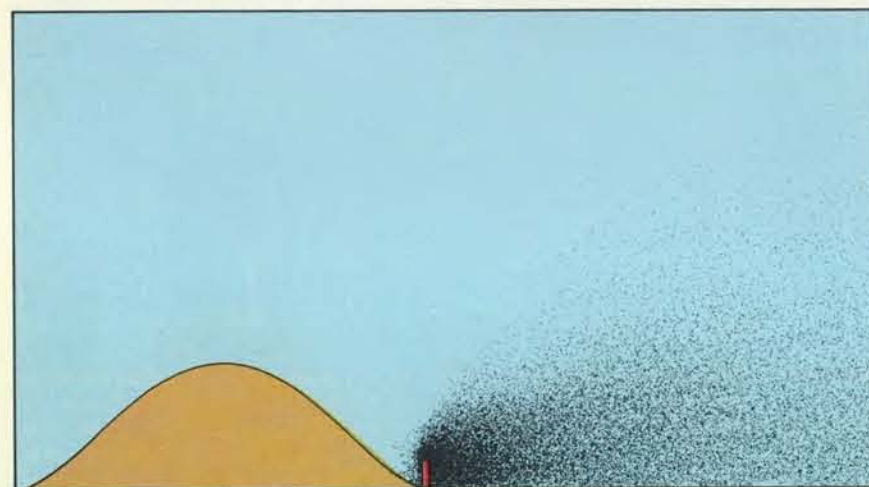
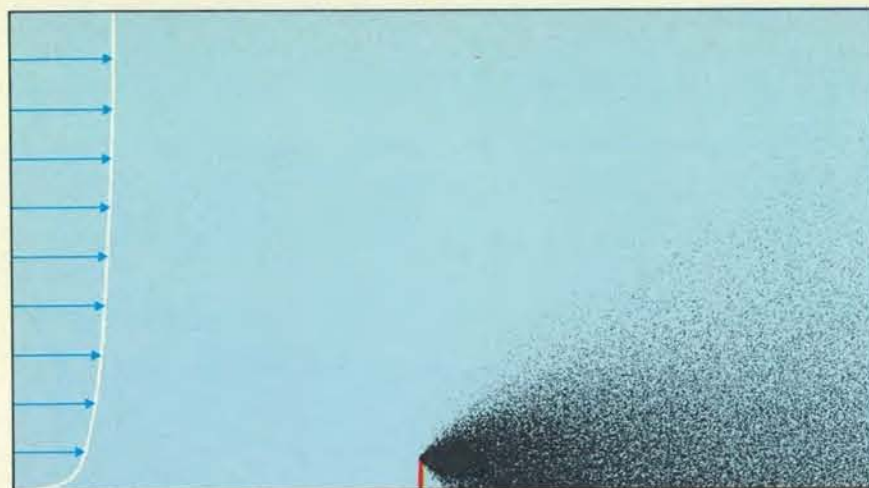
Gli studi sulla dispersione in atmosfera sono iniziati solo all'epoca della prima guerra mondiale non per combattere l'inquinamento, ma per utilizzare gas tossici contro i nemici e sono continuati in modo sistematico a partire dagli anni cinquanta (a seguito delle installazioni delle prime centrali nucleari). A partire dagli anni settanta, si è avuta una ulteriore accelerazione delle ricerche dovuta allo sviluppo di mezzi di calcolo e di strumentazione chimica e meteorologica sempre più potenti e affidabili.

Da un lato infatti i nuovi calcolatori permettono la costruzione di modelli numerici sempre più complessi e realistici; dall'altro le nuove apparecchiature consentono non solo la misurazione puntuale dei parametri di interesse, ma anche la loro valutazione in un dominio tridimensionale in evoluzione nel tempo. Sono esempi di questi nuovi strumenti il SODAR (SOund Detection And Ranging) Doppler, uno strumento che può fornire ogni mezz'ora profili verticali della velocità e della direzione media del vento da 50 a 1000 metri, e i satelliti meteorologici che inviano con continuità immagini dalle quali si può seguire l'evoluzione globale dell'atmosfera.

Nello studio della dispersione di inquinanti in atmosfera si procede, in genere, lungo due linee di ricerca: quella della misurazione in campo e quella della modellistica al calcolatore. In una situazione ottimale è naturale pensare a un processo logico che integri i due diversi metodi, basato su una interazione dinamica fra le due fasi del lavoro. La prima fase consiste nell'esecuzione di misure delle concentrazioni di particolari inquinanti in un certo numero di stazioni fisse e dei principali parametri meteorologici influenzanti la dispersione; la seconda fase riguarda lo sviluppo di modelli che, simulando in modo appropriato le misurazioni effettuate, diano una interpretazione sufficientemente corretta del fenomeno fisico studiato e consentano quindi di estrapolare le valutazioni a zone non coperte da misuratori.

Le misure rilevate suggeriscono il tipo di modello, il relativo grado di complessità e ne valutano le prestazioni; il modello a sua volta, se convincente e appropriato, evidenzia la necessità di nuove misurazioni o di nuovi punti di rilevamento (ottenuti, per esempio, spo-

SODAR Doppler per il telerilevamento del vento in quota. Nel profilo di vento (*qui sopra*), ottenuto attraverso la misura dell'effetto Doppler prodotto dalla turbolenza atmosferica su un'onda acustica inviata verso l'alto, la linea blu indica la velocità e le croci la direzione; il segnale è emesso da tre paraboloidi orientati in tre direzioni differenti. Le misure fornite da questo strumento possono essere utilizzate pienamente dai recenti modelli di diffusione di inquinanti in atmosfera.

Dispersione di inquinanti emessi da quattro sorgenti in un sito a orografia complessa in presenza di vento da sud e su un dominio di 8 × 8 chilometri quadrati. Sono visualizzate le concentrazioni al suolo espresse in microgrammi per metro cubo; le linee in grigio indicano i livelli altimetrici. La simulazione è ottenuta con un modello di tipo *K* (codice HERMES, sviluppato da Électricité de France). Si evidenziano alcuni particolari: le sorgenti 1 e 2 non si uniscono per effetto del rilievo posto a nord; la sorgente 4 ha un notevole impatto al suolo, nonostante la modesta emissione, a causa del camino basso e della pendenza del terreno. I valori sotto le sorgenti indicano l'altezza del camino in metri e la portata dell'inquinante in grammi al secondo.

Il comportamento di un'emissione è diverso su terreno piano o in presenza di un colle. Le particelle sono visualizzate su un piano verticale centrato sull'asse del pennacchio. Il grafico riporta le curve di concentrazione al suolo misurate in esperimenti in galleria del vento (*in rosso*) e calcolate con le simulazioni fatte con il modello a particelle (*in blu*). La presenza del colle (*colori più chiari*) induce concentrazioni al suolo tre volte maggiori e più vicine al punto di emissione. Il modello riproduce bene tale comportamento consentendo anche il movimento di particelle controvento nella zona di scia indotta dal colle. La scala verticale è cinque volte quella orizzontale.

stando le stazioni risultate ridondanti). Questi nuovi dati possono rivelare eventuali lacune del modello e suggerire vie per colmarle, e così via sino a giungere a una comprensione soddisfacente del problema studiato.

È ovvio che se quella appena descritta è in linea teorica la procedura logica più appropriata, non è detto che nella pratica la si possa sempre seguire. Ciò avviene sia per il numero limitato di misurazioni che, anche nelle migliori situazioni, si riesce a effettuare, sia per il non ancora soddisfacente livello di conoscenza della fisica della diffusione (ovvero della turbolenza atmosferica) sinora raggiunto e sia, infine, per le approssimazioni implicite nell'uso dei modelli.

Vale la pena di ricordare che, ove possibile, si fa anche uso delle tecniche di simulazione fisica a scala ridotta (galleria del vento o canale idraulico) che forniscono informazioni complementari sia alle misure in campo sia alla modellistica numerica. Queste tecniche consentono di eseguire esperimenti in condizioni controllate e riproducibili, separando le diverse scale spazio-temporali, cosa impossibile da realizzare in atmosfera reale, in modo da ottenere informazioni più precise e attendibili su particolari aspetti della fisica dell'atmosfera (turbolenza, interazione di flussi a grande scala con catene montuose eccetera).

Vediamo ora di chiarire in quali modi oggi si affronti il problema della simulazione al calcolatore della dispersione degli inquinanti atmosferici, quali siano le applicazioni a scopo di controllo (in tempo reale o no) e di pianificazione e quali le tecniche di validazione dei modelli proposti.

Alcuni tipi di modelli esprimono una relazione fra la concentrazione al suolo di inquinante e la sua sorgente sulla base di relazioni statistiche; altri modelli determinano questa relazione utilizzando correlazioni calcolate a partire dalle serie storiche dei dati di concentrazione. Entrambi i tipi di modelli hanno la caratteristica di trascurare i meccanismi fisici che sono alla base della diffusione. Essi sono però utili perché forniscono previsioni, in generale attendibili, in situazioni non fortemente evolutive.

Altri modelli, quelli qui descritti, hanno l'ambizione di comprendere, e quindi simulare, direttamente i principali processi fisici inerenti la dispersione degli inquinanti in atmosfera, acquisendo una validità più generale e potendo poi essere utilizzati in ogni situazione.

La modellistica fino a oggi sviluppata può essere classificata secondo vari criteri. La suddivisione principale, da un punto di vista fisico, viene usualmente fatta tra modelli euleriani e modelli lagrangiani. Nella fisica dell'atmosfera vengono normalmente usati, per la descrizione dei fenomeni, due possibili sistemi di riferimento: quello euleriano, che osserva da un punto di vista fissato

Una simulazione di diffusione di inquinanti in presenza di inversione di temperatura in quota. La presenza di questo gradiente, tipico per esempio delle stagioni fredde in Valle Padana, blocca la diffusione degli inquinanti verso l'alto creando un accumulo vicino al suolo.

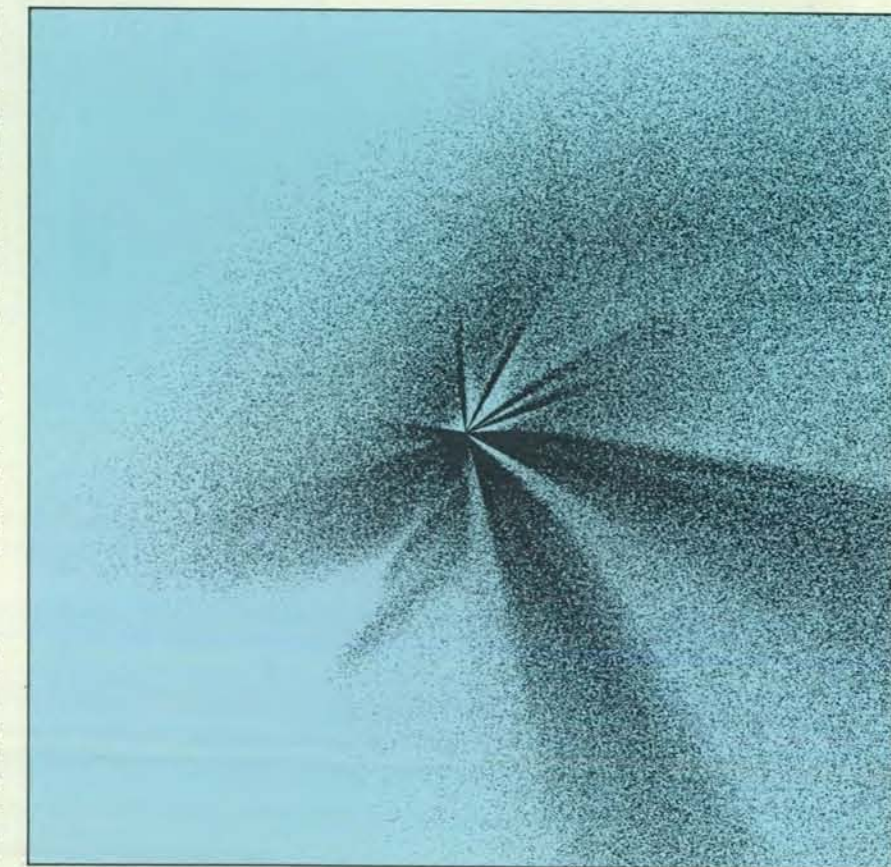
sulla Terra il moto delle masse d'aria, e quello lagrangiano, che invece descrive il moto delle particelle di fluido da un sistema di riferimento solidale con esse.

Nella simulazione del trasporto e della diffusione di inquinanti si adottano gli stessi criteri; più precisamente, in un modello euleriano il processo di dispersione è formulato in termini di un'equazione differenziale risolta su una griglia spazio-temporale fissa (*si veda la finestra a pagina 42*). Questa equazione esprime la conservazione della massa del materiale presente nel dominio di calcolo: viene descritta la variazione spaziale e temporale della concentrazione di inquinanti in atmosfera tenendo conto di diversi fattori: in primo luogo il trasporto, dovuto alle tre componenti del vento medio lungo le tre direzioni cartesiane; in secondo luogo la diffusione turbolenta, dovuta alle fluttuazioni del vento; seguono poi l'intensità e il tipo di sorgente; infine vengono considerate eventuali trasformazioni a seguito di reazioni chimiche, decadimenti radioattivi e processi di rimozione. Questi ultimi si riferiscono al depauperamento della nube di inquinante causato dalla deposizione secca (per rimescolamento turbolento e gravità) e da quella umida (dovuta alle precipitazioni).

Occorre ricordare che si usa distinguere fra trasporto e turbolenza; ciò si fa scomponendo la velocità istantanea del vento nella somma di un termine medio (vento mediato su di un opportuno intervallo temporale, per esempio un'ora) che determina la traiettoria del baricentro della nube di inquinante e di un termine di fluttuazione dovuto alla turbolenza che descrive lo sparpagliamento attorno alla traiettoria.

I modelli lagrangiani descrivono il moto di masse d'aria o di particelle che seguono passivamente il flusso. In particolare, le particelle si muovono seguendo i vortici turbolenti, descrivendo traiettorie casuali. I modelli di questo tipo sono dunque statistici: infatti in essi le grandezze fisiche simulate responsabili dello spostamento delle particelle, quali la velocità per esempio, sono specificate in termini probabilistici, i quali sono soggetti a vincoli di tipo fisico. In altre parole le distribuzioni di probabilità delle grandezze simulate sono costruite a partire dai corrispondenti momenti (valor medio, varianza eccetera) misurati in atmosfera nella situazione in studio (*si veda la finestra alle pagine 44-45*).

In generale si può dire che sia i modelli euleriani sia i modelli lagrangiani, con diverso grado di affidabilità, possono affrontare con successo simulazioni di condizioni meteo-diffusive anche assai complesse (diffusione su terreno accidentato, nella scia di edifici, in caso di ostacoli orografici, in condizioni di cal-

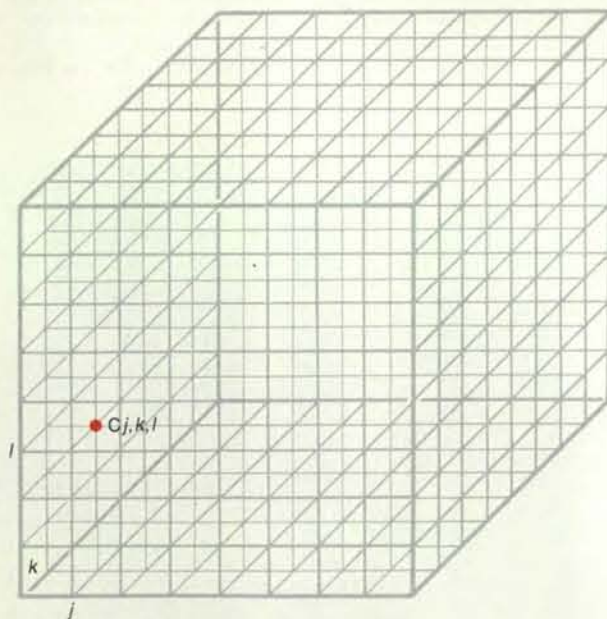
Vista della diffusione di inquinanti con calma di vento in un dominio di un chilometro quadrato. L'emissione è al centro della figura e vicino al suolo: nella simulazione, di un'ora, si è verificata una rotazione completa del vento. Le figure di queste due pagine sono ottenute con i codici a particelle LAMBDA e SPRAY ideati dall'*équipe* degli autori.

I modelli K

I modelli K sono modelli euleriani definiti dall'integrazione dell'equazione di diffusione che consente di calcolare il valore di concentrazione (C) dell'inquinante in ogni posizione dello spazio tridimensionale e a intervalli di tempo successivi, note le condizioni iniziali e i campi tridimensionali di vento (u_i) e di turbolenza (K_i), ove $i = 1,2,3$. In generale, occorre risolvere i termini dell'equazione su una griglia fissa, calcolando in ogni suo nodo il valore $C^n_{j,k,l}$ della concentrazione nel punto di coordinate $<j,k,l>$ all'istante n.

Per ottenere una buona risoluzione del campo di concentrazione occorrerà evidentemente una griglia piuttosto fitta, e ciò tanto più quanto più complesse sono le condizioni del terreno. Di fatto solo grazie ai calcolatori di grande potenza oggi disponibili è possibile utilizzare con continuità questi modelli.

La principale difficoltà che si incontra nel ricorso a questi modelli risiede nell'impossibilità di esprimere in maniera semplice i termini dovuti alla turbolenza. Normalmente questo problema viene superato stabilendo una proporzionalità tra essi e le variazioni spaziali nella concentrazione del materiale diffuso. Questa proporzionalità viene espressa in termini matematici dai parametri K_i (da cui il nome dei modelli); a seconda del grado di complessità con cui tali parametri vengono definiti (ossia da espressioni del primo, secondo, terzo ordine, o più), si hanno diversi tipi di modelli.

I modelli K sono molto adatti per simulazioni di inquinanti in cui il termine dovuto ai processi di trasformazione e di rimozione (R) non è trascurabile; in questi casi bisogna sapere la velocità di reazione chimica degli inquinanti considerati, velocità che dipende in larga misura dalla loro concentrazione. A quel punto è immediato calcolare per ogni cella della griglia la quantità di inquinante rimosso o generato.

Segnaliamo infine che esistono soluzioni analitiche (formule) dell'equazione di diffusione in alcuni casi in cui i campi di vento e di turbolenza siano particolarmente semplici: la più famosa è la soluzione «gaussiana».

Esempio di griglia tridimensionale su cui si risolve l'equazione di diffusione.

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u_i \frac{\delta C}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i}\left(K_i \frac{\delta C}{\delta x_i}\right) + S + R$$

DERIVATA RISPETTO AL TEMPO

TERMINE DI TRASPORTO

TERMINE DI DIFFUSIONE

TERMINE DI SORGENTE

TERMINE DI TRASFORMAZIONE E DI RIMOZIONE

ma di vento, di inversione di temperatura con la quota e così via), utilizzando al meglio l'informazione sperimentale.

Oltre a questa distinzione, di carattere strettamente fisico, i modelli possono essere classificati in base al tipo di problema da affrontare. Una prima distinzione di rilievo tra i modelli è dovuta alle scale spaziali e temporali. Infatti, come si è detto, i fenomeni atmosferici assumono caratteristiche molto diverse a seconda che, per esempio, si considerino eventi riguardanti un intero continente o riguardanti un'area urbana. Sarà di conseguenza molto diverso modellare la dispersione a brevissimo termine e su piccole distanze, cioè a poche ore dalla liberazione, o l'accumulo di inquinanti in mesi o anni, o ancora il trasporto a lunga distanza.

È necessario, inoltre, distinguere il tipo di sorgente, che può essere di tipo puntiforme (camino), lineare (autostrada) o areale (città), posta al suolo o in quota; inoltre più sorgenti possono trovarsi fra loro vicine. In generale, costituisce una sorgente puntiforme una qualsiasi superficie emettitrice, le cui dimensioni siano piccole rispetto alla distanza tra la sorgente stessa e il punto in cui si misura la concentrazione. Va anche considerato poi il tipo di inquinante. Nelle aree urbane, per esempio, il danno maggiore per l'atmosfera è causato dal traffico veicolare, che produce sostanze in grado di reagire chimicamente per effetto della radiazione luminosa. Le conseguenze sono non solo il danno per la salute degli abitanti, ma anche il deterioramento dei materiali e del patrimonio artistico e architettonico.

È bene ricordare che fino a pochi anni or sono la modellistica della dispersione di inquinanti in atmosfera si occupava principalmente di inquinanti gassosi, chimicamente neutri, come è, tipicamente, l'anidride solforosa (SO_2) per tempi di volo dell'ordine di qualche ora. Questa sostanza costituiva infatti il principale fattore di inquinamento atmosferico prodotto dagli impianti industriali, dalle centrali termoelettriche e dagli impianti di riscaldamento domestico. I risultati di tali studi ebbero come effetto quello di forzare il cambiamento del tipo di combustibile (da combustibili ad alto tenore di zolfo a quelli a basso tenore e quindi alla metanizzazione di parte degli impianti), di suggerire il teleriscaldamento, l'uso di sistemi di abbattimento alla bocca dei camini e di alzare sempre più la quota delle ciminiere. Quest'ultimo intervento, però, portando alla dispersione dei fumi su distanze molto maggiori, ha generato nuovi problemi. Infatti certi inquinanti, chimicamente neutri su tempi brevi, possono subire trasformazioni chimiche dopo tempi più lunghi, dando origine a processi di notevole gravità per l'ambiente, come le piogge acide e l'effetto serra. Questi fenomeni (che vengono usualmente indicati come «trasporto transfrontaliero») possono avere anche implicazioni a carattere politico e diplomatico. Ricordiamo a tal riguardo le accese polemiche sorte fra i paesi scandinavi da un lato, e il Regno Unito e i paesi facenti parte della vasta area industriale dell'Europa centrosettentrionale dall'altro, oppure tra Canada e Stati Uniti.

Un altro punto importante è quello dei dati di ingresso necessari al modello, ossia dei dati sulla meteorologia e sulle emissioni. Spesso, nelle situazioni reali, si deve utilizzare una banca dati povera sia nelle variabili misurate, sia nel numero di punti di misura. In questi casi alcuni modelli semplici (per esempio il modello gaussiano illustrato nella finestra di pagina 47) possono fornire, su tempi di media lunghi, risultati relativamente accettabili. D'altronde, l'uso di modelli più sofisticati non darebbe risultati migliori, data l'insufficiente informazione di base. Altri modelli, che potremmo definire «avanzati», richiedono un insieme di dati iniziali molto ricco. Essi permettono però di tener conto delle evoluzioni spazio-temporali delle variabili meteorologiche (campi di vento e di turbolenza indotti, per esempio, dalle caratteristiche orografiche del terreno e da fenomeni termici).

Campo di vento su orografia complessa: è rappresentato un sito della Valle Leventina (Svizzera) in un dominio di 50 × 50 × 5 chilometri con alcune stazioni di misure meteorologiche durante la campagna sperimentale TRANSALP-1989.

Dalle singole misure di vento si può ricostruire l'intero campo con modelli matematici. Sulla rappresentazione bidimensionale è sovrapposto un campo di vento vicino al suolo ottenuto con il codice MINERVE sviluppato da Électricité de France.

I modelli a particelle

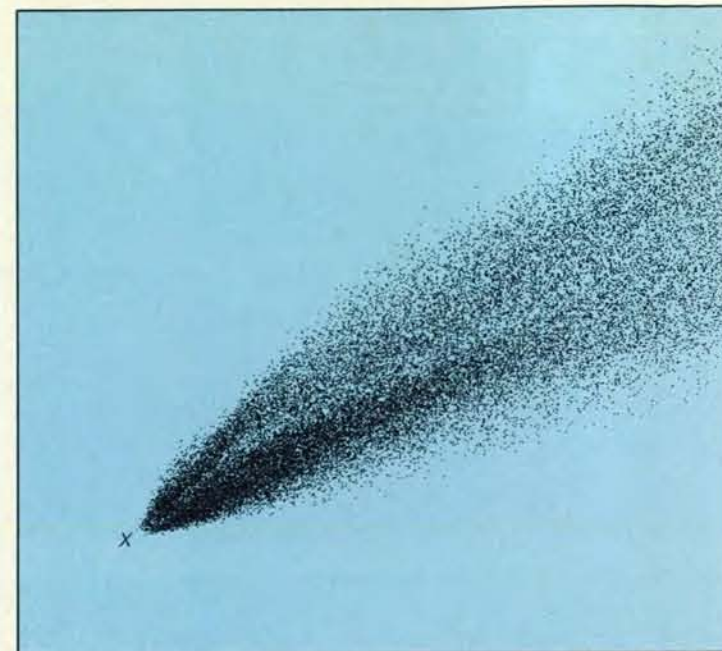
La dispersione di un inquinante è simulata attraverso il moto di particelle fittizie (*computer particle*) le cui traiettorie permettono di calcolare il campo di concentrazione della sostanza emessa. L'ipotesi di base è che le traiettorie percorse da queste particelle nel dominio di calcolo tridimensionale del calcolatore simulino, in media, le traiettorie percorse, nell'atmosfera reale, da masse d'aria situate, all'istante iniziale, nella medesima posizione.

Pertanto, così come il moto di queste ultime è la risultante dell'interazione su di esse del moto medio (vento) e della sua turbolenza, il moto delle particelle fittizie è calcolato parametrizzando in modo opportuno tali processi. Il sistema di equazioni che ne risulta è il seguente:

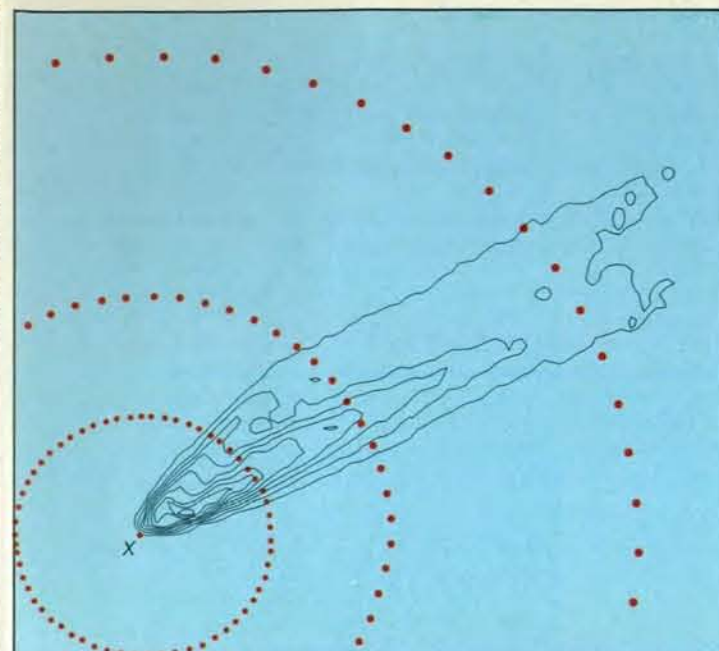
$$\frac{\delta U'_i(t)}{\delta t} = -\beta U'_i(t) + \gamma \qquad (1)$$

$$\frac{\delta X_i(t)}{\delta t} = U_i(t) + U'_i(t) \qquad (2)$$

dove i si riferisce, a turno, alle tre direzioni di un sistema cartesiano x, y e z; $X_i(t)$ rappresenta la componente i-esima della posizione della particella al tempo t, $U_i(t)$ è la componente del vettore vento medio al tempo t nella direzione i-esima, $U'_i(t)$ è la componente della fluttuazione della velocità dovuta alla turbolenza atmosferica nella medesima direzione.

L'equazione (1) è quella usata all'inizio del secolo da Paul Langevin per descrivere il moto browniano e la diffusione molecolare con un metodo alternativo (ma egualmente efficace) a quello proposto da Albert Einstein. In essa la forza agente su una particella è divisa in due termini che descrivono l'interazione tra la particella di fluido considerata e il resto del fluido nel modo seguente: da un lato il fluido è un mezzo continuo, macroscopico, che esercita una forza di attrito sulla particella direttamente proporzionale alla sua velocità $[-\beta]$ $U'_i(t)$ e dall'altro lato il fluido è visto come un insieme di vortici turbolenti che generano fluttuazioni casuali

(γ) di pressione sulla particella le quali causano a loro volta accelerazioni casuali delle particelle stesse.

Integrando numericamente, alle differenze finite, l'equazione (1) si ottengono i valori delle velocità turbolente $U'_i(t)$ da introdurre nell'equazione (2); quest'ultima, integrata a sua volta, fornisce infine le posizioni della particella dovute agli effetti combinati del vento medio e della turbolenza.

Per effetto delle equazioni (1) e (2) le particelle vengono spostate nel dominio di calcolo senza problemi di griglia utilizzando i valori di velocità media direttamente dalle misure di vento relative alla posizione in cui si trovano e deducendo i valori delle velocità dovute alla turbolenza dalla misura delle varianze delle componenti delle velocità del vento sempre in quel punto.

Simulazione della liberazione di un inquinante da una sorgente posta in *X* effettuata con un modello a particelle: nell'illustrazione a sinistra sono visualizzate (*dall'alto*) le particelle che hanno raggiunto il suolo e, a destra, le corrispondenti isolinee di concentrazione calcolate in base alla densità delle particelle. È quindi possibile confrontare le concentrazioni al suolo misurate dai prelevatori posti sottovento alla sorgente (*punti in rosso*) con quelle calcolate con il modello.

Come si vede, lo schema sopra descritto permette di utilizzare direttamente le misure disponibili: in particolare le potenzialità messe a disposizione dalla nuova strumentazione di rilevamento a distanza possono essere sfruttate facilmente e proficuamente da questi modelli (per esempio il SODAR Doppler, oltre alla misura del profilo verticale delle componenti della velocità del vento, fornisce anche il profilo delle loro varianze). Ciò rappresenta certamente un vantaggio rispetto ai modelli *K* che necessitano sempre di una parametrizzazione dei dati di turbolenza per poter ricavare i coefficienti di diffusione *K*. Si noti che lo stesso problema compete ai modelli gaussiani (*si veda la finestra a pagina 47*) in quanto la turbolenza viene introdotta dalla scelta della famiglia di curve σ_y, σ_z; questa parametrizzazione è spesso ambigua e può cambiare da sito a sito.

Il calcolo della dispersione viene fatto generando casualmente un grande numero di particelle, le quali si muovono in accordo coi parametri atmosferici che descrivono il trasporto e la turbolenza; la stima della concentrazione media in un punto è ottenuta contando il numero di particelle che vengono a trovarsi in un certo volume contenente il punto dato.

I modelli a particelle si fanno anche preferire per la minor difficoltà nel riprodurre il termine di sorgente: si possono simulare emissioni puntiformi, lineari o areali di qualsivoglia dimensione (variando opportunamente il volume iniziale in cui vengono generate le particelle), come pure emissioni continue, variabili nel tempo o istantanee (generando un numero appropriato di particelle a ogni passo temporale).

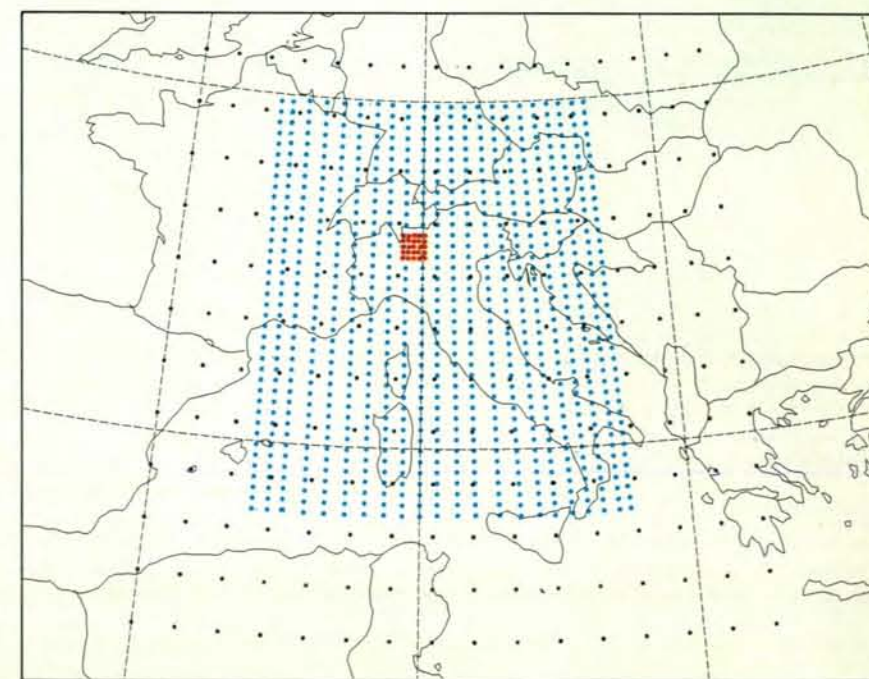
Diversi studi, di cui una parte consistente effettuata dagli autori e dai loro collaboratori, hanno ormai verificato la capacità di questi modelli nel simulare correttamente la diffusione in atmosfera sia per la mesoscala sia per la scala locale. Validazioni con misure di traccianti hanno dimostrato che le previsioni delle concentrazioni al suolo sono in buon accordo con i dati sperimentali anche in condizioni meteorologiche considerate generalmente difficili da simulare, come in casi di instabilità convettiva, calma di vento e così via.

Per quanto complessa, quest'ultima situazione è molto comune: si pensi, per esempio, alla diffusione di inquinanti in un sito costiero. Lo sviluppo di una brezza di mare genera un campo di vento variabile nel tempo, con fortissime discontinuità verticali in direzione e in modulo fino a una rotazione completa con la quota. Anche il campo di turbolenza presenta una variabilità molto accentuata a seguito del trasporto di aria stabile e poco rimescolata dal mare alla terra, dove invece è presente uno strato convettivo fortemente rimescolato. L'avanzata di un fronte di brezza, spesso resa più complessa dalla presenza di rilievi o da terreni di tipo e rugosità diversi, è poi un fenomeno intrinsecamente quadridimensionale.

Per simulare condizioni di tale complessità occorre disporre di modelli che risolvano le equazioni della fluidodinamica, fornendo come risultato campi di vento e di turbolenza tridimensionali in evoluzione temporale, che quindi possono essere usati come ingresso dei modelli di diffusione. Si tratta di modelli di notevoli dimensioni e complessità che integrano numericamente le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia e che richiedono una grande potenza di calcolo. La risoluzione su una griglia numerica, tanto più accurata quanto più potenti sono i calcolatori, permette di introdurre in modo approssimato, ma corretto, l'orografia di un sito e di tenere conto delle disomogeneità spaziali e temporali alle quali si accennava prima. Esistono però difficoltà e ambiguità per la definizione delle condizioni al contorno e, in particolare, risulta difficile conoscere la loro evoluzione. È impossibile infatti definire a priori quello che succede fuori del dominio di calcolo, a meno di disporre di una «cascata» di modelli che, partendo dai campi termodinamici previsti a scala planetaria, scendano fino alla scala locale: i dati forniti in uscita dagli uni costituiscono dati in ingresso dei successivi.

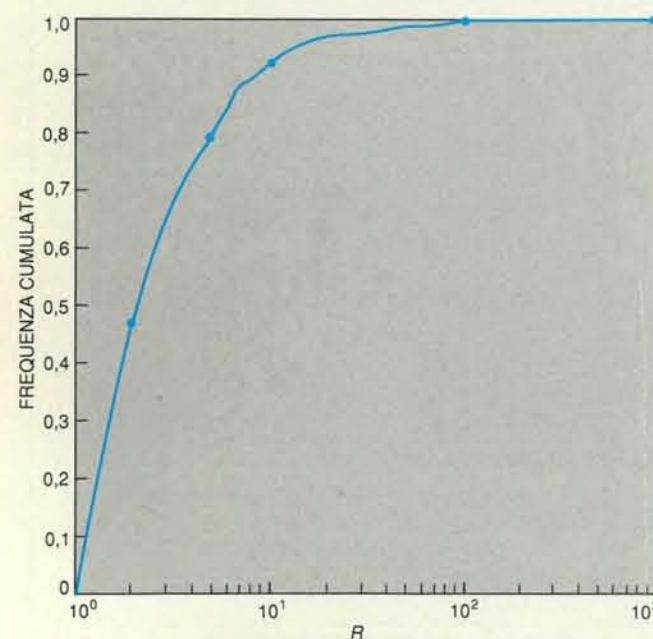
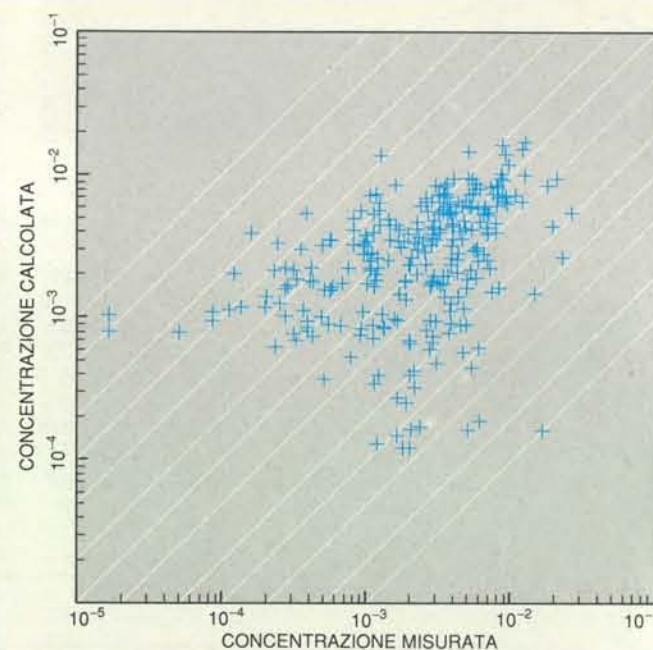
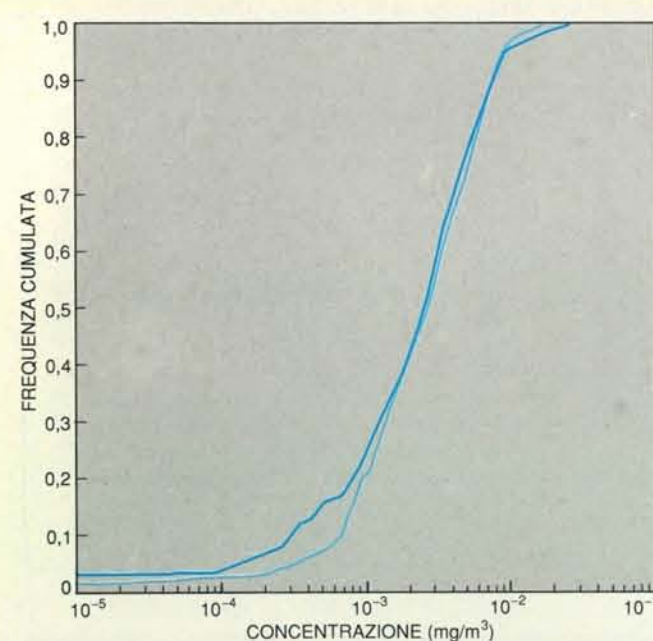
Nei modelli fluidodinamici è in genere difficoltoso introdurre direttamente nei calcoli i dati meteorologici: se i valori sperimentali sono troppo disomogenei o discontinui, possono non essere ben risolti dalla griglia del dominio di calcolo e causare instabilità numeriche con conseguente arresto dei programmi di calcolo. Il problema può essere in parte superato usando, in partenza, un campo di vento fornito da interpolatori di dati sperimentali basati unicamente sul principio di conservazione della massa. Se si dispone di buone misure, distribuite in modo significativo sul dominio di interesse, questo ultimo modello può essere utilizzato anche da solo (in situazioni non evolutive e su tempi brevi) per interpretare ed estendere le misure di vento su un dominio tridimensionale completo e fornire una descrizione del trasporto (vento medio) anche su orografia complessa.

Rimanendo al problema dei dati meteorologici di ingresso ai modelli, occorre precisare infine che il tipo di variabili, la frequenza di campionamento, il numero e l'ubicazione dei punti di misura, dipendono ovviamente dalle scale dei fenomeni studiati. Inoltre, se alla piccola scala, almeno in linea teorica, essi possono essere predisposti in modo congruo al dominio di simulazione, nel caso della mesoscala, ove le circolazioni atmosfe-

Scale spaziali diverse per il calcolo del trasporto e diffusione di inquinanti. La griglia di fondo (*in nero*) rappresenta la scala continentale: su questa maglia di punti si fornisce, ogni giorno, la previsione delle variabili meteorologiche elaborate con modelli fluidodinamici dal Centro europeo di Reading. Il quadrilatero centrale con griglia (*in blu*) indica la scala regionale: usando i dati previsti sulla griglia più grande e una più dettagliata base orografica, i modelli possono definire meglio le variabili meteorologiche. Può essere necessario scendere alla scala locale (*in rosso*) per simulare una singola sorgente di inquinante usando i risultati forniti dal modello a mesoscala.

riche sono determinate sia dalla meteorologia a grande scala sia dall'orografia, è preferibile utilizzare i sopracitati modelli fluidodinamici. Nel caso, infine, del trasporto su grande distanza, si fa uso, in genere, dei dati forniti dai grandi centri internazionali di previsione meteorologica, come l'European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) di Reading, nel Regno Unito.

Per quanto riguarda infine le tecniche di validazione dei modelli, è opportuno tener presente che esistono, all'interno della comunità scientifica, due differenti scuole di pensiero. Alcuni sostengono che, se il modello descrive correttamente i processi fisici responsabili della dispersione, ovvero contiene le equazioni «giuste», è un buon modello, quali che siano i risultati dei confronti con i dati misurati, dato che questi ultimi, normalmente, sono insufficienti e affetti da errori di misura.

Altri, e sono la maggioranza, ritengono che la bontà di un modello possa comunque essere dimostrata unicamente con un confronto approfondito delle sue previsioni con i dati. Comune a entrambi i modi di pensare è la constatazione che un modello «perfetto» non esiste, a causa dell'impossibilità di descrivere nel più fine dettaglio la fenomenologia della dispersione, così come non esistono serie di dati così precisi e completi da poter essere un banco di prova definitivo per i modelli. Ne segue che la tendenza è, e non può che essere, quella di operare su entrambi i fronti: da un lato, migliorare i modelli e, dall'altro, le misurazioni, tenendo comunque presente che l'imprecisione dei dati, intrinseca in ogni tipo di misurazione, limita la precisione di previsione dei modelli, ammesso, per assurdo, che quest'ultima possa essere assoluta. In altre parole, se si stima, per esempio, che l'errore di misura dei dati in ingresso sia del 20 per cento, e quello delle concentrazioni al suolo del 10 per cento, è ovvio che non ha senso, per il modello, parlare di precisione superiore al 30 per cento.

Allo scopo di fornire un terreno comune di intesa fra coloro che operano in questo campo, si è sviluppata quella che viene comunemente chiamata la *model evaluation*, una stima delle prestazioni

Alcuni esempi di elaborazioni statistiche effettuate per verificare le prestazioni dei modelli. In un insieme di dati di concentrazione al suolo ottenuti in campagne sperimentali con traccianti o con reti di monitoraggio, una volta eseguite le simulazioni della emissione con un modello di diffusione, occorre produrre alcune elaborazioni. In alto a sinistra, viene presentato il confronto globale fra le distribuzioni cumulate delle concentrazioni misurate (*in blu intenso*) e quelle previste dal modello (*in blu chiaro*): in questo caso si evidenzia che l'intero insieme di dati è ben simulato. Tuttavia un confronto più accurato fra i singoli valori nello stesso punto spaziale e allo stesso tempo (*qui sopra*) mette in maggiore evidenza i singoli errori. Le linee in negativo al di sopra (o al di sotto) della bisettrice (linea di perfetto accordo) evidenziano sovrastime (o sottostime) dei valori simulati rispetto a quelli calcolati di un fattore 2, 5, 10, 20, 50 e 100. Un altro grafico globale (*a sinistra*), significativo della bontà o meno della simulazione, è dato dalla distribuzione cumulata di tutti i valori del rapporto *R* fra la concentrazione calcolata e la concentrazione misurata (con $R = 1/R$ se $R < 1$). I punti lungo la curva che descrive la distribuzione indicano la percentuale di dati che stanno dentro un fattore di errore 2, 5, 10, 100 e 1000. I tre grafici si riferiscono a uno stesso insieme di dati e mostrano un accordo soddisfacente fra la simulazione e le misure allo stato attuale delle potenzialità dei modelli e dell'affidabilità delle misure.

Il modello gaussiano

Grazie alla sua estrema semplicità, quello gaussiano è il modello di dispersione maggiormente usato. Infatti, la relazione che lega il tasso d'emissione con la concentrazione in un certo punto dello spazio sottovento alla sorgente è di tipo analitico e non richiede, in generale, l'uso di grandi risorse di calcolo.

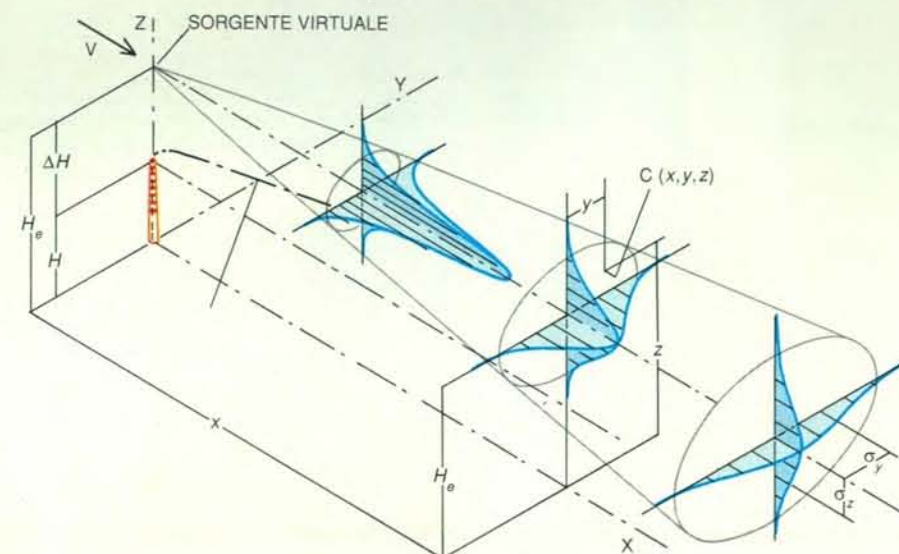
I modelli gaussiani sono raccomandati da numerosi enti governativi per le valutazioni di impatto ambientale; la statunitense EPA (Environmental Protection Agency) distribuisce una biblioteca di programmi per lo studio della diffusione di inquinanti in atmosfera, composta quasi esclusivamente da questi modelli, normalmente usati anche per stabilire le responsabilità in caso di danni ambientali e per la concessione di autorizzazioni per nuovi insediamenti industriali.

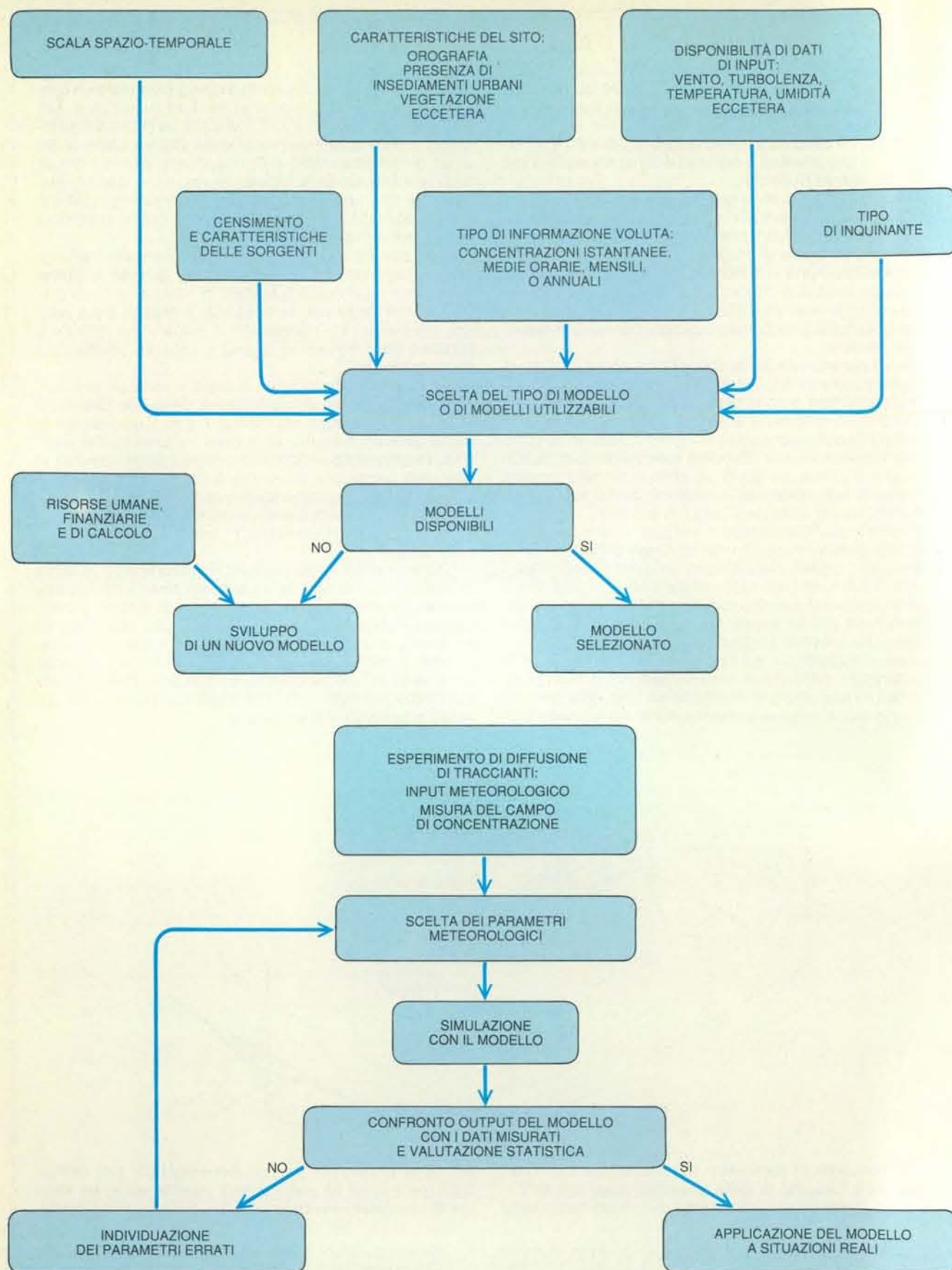
La corrispondenza fra le previsioni a breve periodo di concentrazione di inquinante al suolo e le misure sperimentali sono ben lontane dall'essere soddisfacenti (errori di 1-2 ordini di grandezza sono abituali anche in condizioni meteorologiche abbastanza uniformi), tuttavia le stime fornite possono essere attendibili relativamente ai massimi assoluti (per la durata di un anno e su tutta la zona circostante una sorgente) e possono quindi essere utili per segnalare le condizioni peggiori possibili.

I modelli gaussiani vengono utilizzati anche per la stima delle concentrazioni medie su lunghi periodi (annuali e stagionali: modelli climatologici). In questo caso l'accordo con i valori misurati può essere buono purché siano note le caratteristiche di funzionamento delle sorgenti degli inquinanti più importanti e la meteorologia del sito in esame non presenti frequenti disomogeneità verticali. Il modello climatologico, se validato dai dati di una rete di monitoraggio, permette di studiare separatamente gli effetti delle varie sorgenti distribuite su una data area; si possono cioè stimare la concentrazione di inquinante prodotta da ogni singola sorgente e quindi esercitare un controllo su di essa; si possono inoltre fare simulazioni relative all'installazione di nuovi impianti e verificare il sovraccarico d'inquinante così prodotto sul sito in esame, ai fini di un dimensionamento e di una localizzazione ottimali. Si può infine studiare l'effetto di riduzione dell'inquinamento di una certa area a seguito di parziali variazioni di combustibile (da gasolio a metano) o di ipotesi alternative quali il teleriscaldamento.

Nello specifico, i pochi parametri che entrano nella relazione, agevolmente ottenibili anche quando si possa far ricorso a un numero limitato di misurazioni, sono la portata dell'inquinante emesso (*Q*), il modulo della velocità del vento (*V*), i parametri di dispersione laterale e verticale del pennacchio (σ_y, σ_z) e l'altezza effettiva del pennacchio (H_e).

I parametri di dispersione laterale e verticale del pennacchio sono legati ai coefficienti di diffusione turbolenta che vengono utilizzati nei modelli *K* e possono essere ricavati in modo empirico da misure meteorologiche semplici. In letteratura si possono trovare i valori misurati in casi reali per diversi tipi di sito e diverse situazioni meteorologiche, legate principalmente alla stabilità atmosferica. In base a questi dati si possono costruire curve che danno i valori di dispersione in funzione della distanza dalla sorgente.

L'altezza effettiva del pennacchio rappresenta l'altezza di livellamento dei fumi ottenuta come somma dell'altezza geometrica del camino da cui sono stati emessi e dalla sopraelevazione (*plume rise*) dovuta alla differenza di temperatura con l'aria e alla velocità di uscita. Sulla base di misurazioni sperimentali e di considerazioni teoriche sono state sviluppate diverse formule per la stima di tale parametro in funzione dei dati meteorologici (velocità del vento e stabilità) e di emissione.

La distribuzione di inquinante del pennacchio viene calcolata sulla base del modello gaussiano (espresso dall'equazione riportata qui sotto): sono qui visualizzati alcuni profili di concentrazione tridimensionali (*in blu*) dell'inquinante emesso da una sorgente puntiforme in un sistema di coordinate orientato nella direzione del vento medio.

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\,\sigma_y\sigma_z\,V}\,\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left(\exp\left(\frac{-(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right)$$

Lo studio modellistico di un caso di dispersione di inquinanti deve essere realizzato seguendo gli schemi qui mostrati. Come prima cosa deve essere effettuata la scelta del modello (*in alto*), analizzando il problema e valutando gli obiettivi da raggiungere; quindi si deve cercare di ottimizzarne le prestazioni (*in basso*). Bisogna ricordare che nelle applicazioni reali la validazione del modello risulta spesso difficoltosa per la mancanza di un numero sufficiente di dati di input.

dei modelli. Essa utilizza metodi statistici basati sul confronto fra le serie di dati previste dal modello e quelle misurate. Vi saranno così tecniche di confronto basate sulle serie delle differenze fra i valori misurati e calcolati, oppure sul rapporto fra di essi, oppure ancora sulla loro correlazione. Alcune di queste tecniche privilegiano una corretta dislocazione spaziale delle previsioni, altre una corretta stima dei valori di picco, altre ancora la distribuzione globale delle concentrazioni. La scelta di una o più tecniche di confronto dipende dagli obiettivi che ci si pone nei casi particolari e dal tipo di simulazione (a breve o a lungo periodo) e di inquinante.

In conclusione si può affermare che oggi la comunità scientifica dispone di vari tipi di modelli per simulare la dispersione degli inquinanti in atmosfera. La scelta del modello «giusto» per il particolare problema da studiare deve essere fatta sulla base della minore o maggiore disponibilità di informazioni (dati di emissione, meteorologici e di concentrazione), tipo di inquinante (primario o secondario, tossico eccetera), tempo entro cui tipicamente si vuole avere la previsione (a seconda che si tratti di una emergenza a seguito di un incidente, della pianificazione di eventuali interventi su emissioni continue, del rilascio di autorizzazioni per nuovi insediamenti, o di altre situazioni), della scala spaziale del fenomeno studiato e così via.

Sebbene persistano lacune nella conoscenza della fisica della diffusione turbolenta, il continuo progresso della modellistica da un lato e, dall'altro, delle tecniche di misurazione, permette ora di affrontare il problema dell'inquinamento con un livello di confidenza molto superiore di quanto fosse possibile fare 15 o 20 anni or sono. È anche assai importante che le tecniche di *model evaluation* ci consentano di stimare, ovvero quantificare, le prestazioni dei modelli e quindi delle loro previsioni. È peraltro anche ovvio che non ci si può ancora accontentare dei risultati acquisiti.

Accenneremo qui, a mo' di esempio, agli sforzi che si stanno facendo a livello internazionale in questa direzione. Nell'ambito del Progetto europeo EUREKA sono attivate linee di ricerca congiunte proprio su questo obiettivo: il gruppo di lavoro di cui gli autori fanno parte (costituito dal Servizio ambiente di Milano della Direzione studi e ricerche dell'ENEL, dall'Istituto di cosmogeofisica del CNR a Torino, dall'Istituto di fisica generale dell'Università di Torino) collabora da alcuni anni al sottoprogetto TRACT (*Transport of Air Pollutants over Complex Terrain*). Questo consta di una parte sperimentale (effettuata tramite campagne di misurazioni meteo-chimiche in siti a orografia complessa, accompagnate da liberazione e successivo prelievo in opportuni punti di traccianti gassosi, ossia di sostanze chimiche inerti, non tossiche e non presenti in natura) e di una modellistica volta a validare, sulla base dei dati sperimentali ottenuti con dette campagne, modelli di diffusione di inquinanti in atmosfera.

Nelle campagne eseguite fino a oggi si sono potuti verificare il percorso e la diluizione di questi traccianti su distanze e su tempi sempre più lunghi: dalla diffusione all'interno delle valli sino al superamento di passi alpini come il Gottardo.

Il lavoro di molti gruppi di ricercatori europei, tra cui quello di cui fanno parte gli autori (che in particolare hanno realizzato un modello lagrangiano tridimensionale a particelle adatto per simulazioni su terreno complesso e con variabili meteorologiche che evolvono nel tempo), è volto alla messa a punto e alla validazione di una serie di modelli per simulare correttamente il comportamento di questi traccianti, in modo da poter disporre per il futuro di strumenti sempre più affidabili per la previsione dell'inquinamento atmosferico.

BIBLIOGRAFIA

ANFOSSI DOMENICO, BOSSA FLAVIO e RICHIARDONE RENZO, *La dispersione di inquinanti in atmosfera a scala locale* in «Le Scienze», n. 129, maggio 1979.

NIEUWSTADT F. T. M. e VAN DOP H., *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*, D. Reidel, Dordrecht, 1982.

ANFOSSI DOMENICO, *Previsione dell'altezza effettiva dei pennacchi di fumo in atmosfera*, Quaderni del Progetto finalizzato: Promozione della qualità dell'ambiente, CNR, Roma, 1982.

PASQUILL FRANK e SMITH BARRY, *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood, Chichester, 1983.

BRUSASCA GIUSEPPE, ANFOSSI DOMENICO e TINARELLI GIANNI, *Comparison between the Results of a Monte Carlo Atmospheric Diffusion Model and Tracer Experiments* in «Atmospheric Environment», 23, n. 6, pp. 1263-1280, 1989.

FERRARA VINCENZO (a cura), *Inquinamento atmosferico*, «Le Scienze Quaderni» n. 58, febbraio 1991.

FINZI GIOVANNA e BRUSASCA GIUSEPPE, *La qualità dell'aria: modelli previsionali e gestionali*, Masson, Milano 1991.

BRUSASCA GIUSEPPE, ANFOSSI DOMENICO e TINARELLI GIANNI, *Particle Model Simulation of Diffusion in Low Wind Speed Stable Conditions* in «Atmospheric Environment», 26, n. 4, pp. 707-723, 1992.

ANFOSSI D., FERRERO E., BRUSASCA G., TINARELLI G., TAMPIERI F., TROMBETTI F. e GIOSTRA U., *Dispersion Simulation of a Wind Tunnel Experiment with Lagrangian Particle Models* in «Il Nuovo Cimento», 15 C, marzo-aprile 1992.

Colture transgeniche

Nei prossimi anni le biotecnologie consentiranno di produrre, senza rischi per l'ambiente, piante resistenti ai parassiti e agli erbicidi, frutti meno deperibili e alimenti più ricchi dal punto di vista nutrizionale

di Charles S. Gasser e Robert T. Fraley

Da almeno 10 000 anni le piante coltivate vengono modificate al fine di renderle sempre più adatte alle esigenze dell'uomo. I primi agricoltori miglioravano le colture semplicemente selezionando i semi delle piante che avevano i caratteri desiderati; negli ultimi cento anni, il miglioramento vegetale è avvenuto secondo procedimenti più rigorosi. Già si erano ottenuti risultati significativi mediante incroci intraspecifici; in anni recenti si sono registrati notevoli progressi incrociando specie diverse - quindi sessualmente incompatibili - appartenenti alla stessa famiglia. Oggi abbiamo a disposizione un metodo promettente per ottenere piante dalle caratteristiche superiori: l'ingegneria genetica. Con il metodo del DNA ricombinante si possono trasferire segmenti di materiale genetico, specifici e utili, da un organismo all'altro, senza che tra donatore e ricevente vi debba essere alcuna affinità.

Un simile procedimento può aumentare notevolmente la diversificazione dell'intero repertorio di caratteri, tra i quali il selezionatore può scegliere quelli che gli sembrano più interessanti. Oggi, in laboratorio, si riescono a produrre piante che resistono agli insetti, ai virus e agli erbicidi. Si possono inoltre ottenere frutti che non si deteriorano e cereali più nutrienti ed economici.

Le prime piante transgeniche sono state prodotte meno di dieci anni fa. Da allora, l'ingegneria genetica è stata utilizzata per più di 50 specie vegetali. Grazie a essa, si sono fatti progressi d'importanza capitale nella comprensione dei processi di base che regolano lo sviluppo delle piante. Per quanto riguarda l'introduzione sul mercato di piante modificate geneticamente si tratta, invece, di aspettare ancora qualche anno.

Anche se l'ingegneria genetica è una tecnologia più complessa delle pratiche tradizionali di miglioramento vegetale, essa è altrettanto sicura. In entrambe le vie, nel genoma di una pianta viene introdotto nuovo DNA, che viene poi mantenuto in esso stabilmente e fatto esprimere. Un recente rapporto della National Academy of Sciences statunitense concludeva così: «Le piante modificate con metodi a livello molecolare e cellulare non dovrebbero porre rischi diversi da quelle modificate, per caratteri analoghi, con i metodi genetici classici». Nel febbraio 1992, la Casa Bianca ha stabilito che i prodotti ottenuti mediante ingegneria genetica non debbano essere soggetti a speciali norme federali, in quanto non danno origine ad alcun rischio incontrollato.

In questo articolo verranno descritti i metodi sinora utilizzati per manipolare geneticamente le piante. Verranno anche descritte le basi teoriche delle attuali applicazioni e i progressi compiuti negli ultimi anni.

Il primo sistema pratico (e ancor oggi quello maggiormente impiegato) per la manipolazione genetica delle piante si basa sulla capacità dell'agente patogeno *Agrobacterium tumefaciens* di trasferire una parte del proprio DNA nelle cellule vegetali, capacità che può essere sfruttata dopo aver introdotto un opportuno insieme di geni in uno o più dei segmenti di DNA del batterio. Questo DNA, chiamato DNA trasferito (T-DNA), si integra quindi nei cromosomi delle cellule vegetali infette e le induce a produrre quantità elevate di ormoni vegetali che inducono la pianta a sviluppare nuove strutture, per esempio tumori o masse radicali. Su questi tessuti, che proliferano attivamente dando origine a una galla o tumore del colletto, l'*Agrobacterium* trova un ambiente e una fonte alimentare idonei.

Per trasformare il batterio in un efficiente veicolo per il trasferimento del DNA, bisognava tuttavia rimuovere da esso i geni che causavano la malattia: provocare, di fatto, un'alterazione che lo rendesse innocuo. Ricercatori della Monsanto Company e della Washington University, negli Stati Uniti, e gruppi diretti da Jozef Schell del Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung di Colonia, e da Marc van Montagu dell'Università statale di Gand, in Belgio, hanno affrontato questo compito per la prima volta nel 1983. Per eliminare i geni che provocano i tumori essi si sono basati sulla ricombinazione tradizionale del DNA. L'operazione rende innocuo il batterio, cioè gli toglie la capacità di provocare la malattia, ma lascia intatto il meccanismo per il trasferimento del DNA (si veda l'articolo *Un vettore che introduce nuovi geni nelle piante* di Mary-Dell Chilton in «Le Scienze» n. 180, agosto 1983).

Il primo gene manipolato geneticamente e prodotto con *Agrobacterium* dai gruppi della Monsanto e di Colonia ha reso le cellule resistenti all'antibiotico canamicina, che inibisce la crescita vegetale. L'essere riusciti a ottenere mediante ingegneria genetica la resistenza alla canamicina ha rappresentato una vera e propria conquista per due ragioni. Si è infatti così dimostrato in primo luogo che geni e proteine estranei potevano essere espressi nelle piante e, in secondo luogo, che la resistenza alla canamicina è un utile «marcatore». Dato che soltanto un piccolo numero di cellule assume, integra ed esprime il DNA introdotto, sono le proprietà che fungono da marcatore a identificare quelle cellule in cui l'introduzione di geni ha avuto buon esito.

Dato che le cellule vegetali sono totipotenti (come cellule indifferenziate sono cioè in grado di generare un intero organismo), dalle cellule trasformate possono svilupparsi piante complete, in grado di riprodursi normalmente. Per l'ingegneria genetica, la maggior parte dei metodi si basa oggi su cellule di espianti, ottenute cioè da piccoli frammenti della pianta. Il nostro collega Robert B. Horsch della Monsanto è diventato famoso per aver trovato il sistema di utilizzare un comune punzone per praticare fori nella carta allo scopo di ritagliare dischi dalle foglie. I dischi così ottenuti venivano poi impiegati per trasformare le cellule vegetali mediante *Agrobacterium*. (Horsch aveva l'abitudine di portare un punzone nella tasca della giacca, sempre pronto a dare una dimostrazione del metodo.) Il trasferimento di geni mediato da *Agrobacterium* viene oggi ordinariamente impiegato in centinaia di laboratori industriali e universitari in tutto il mondo. Alla Monsanto, sono state prodotte in questo modo più di 45 000 linee di discendenza vegetali transgeniche indipendenti.

Il metodo è semplice e preciso, ma purtroppo molte specie vegetali, tra le quali cereali di notevole importanza economica, come il riso, il mais e il frumento, non sono ospiti naturali di *Agrobacterium* e, pertanto, non sono così facilmente trasformate da questo procedimento. Di conseguenza, sono stati compiuti notevoli sforzi per elaborare sistemi alternativi.

Uno fra i primi di questi sistemi alternativi è stato l'introduzione di DNA libero in protoplasti, cellule vegetali private per via enzimatica della parete cellulare. L'impiego dei protoplasti si rende indispensabile, dato che i pori delle pareti cellulari sono troppo piccoli per permettere con facilità il passaggio del DNA. Nei protoplasti l'unica barriera è rappresentata dalla membrana plasmatica, che può comunque essere attraversata dal polietilenglicol, un denso polimero organico che rappresenta il vettore chimico più comunemente usato per trasportare il DNA. Il DNA può anche essere veicolato attraverso la membrana plasmatica mediante elettroperforazione, un processo in cui brevi impulsi a tensione elevata producono pori, per un breve periodo di tempo, nella membrana del protoplasto. Attraverso questi spazi le molecole di DNA possono penetrare all'interno.

Questi procedimenti non si basano su alcuna interazione biologica particolare e pertanto, in teoria, possono essere considerati metodi generali di trasformazione cellulare. Ma la rigenerazione di piante a partire da protoplasti isolati è risultata problematica in molte specie, in particolare nei più importanti cereali. Il mais e il frumento reagiscono scarsamente, dando origine di solito a piante sterili.

Di conseguenza, sono stati ricercati metodi per introdurre il DNA in cellule vegetali intatte, cioè ancora dotate di parete cellulare. Un metodo abbastanza semplice consiste nell'iniettare DNA, ma per parecchie ragioni questa microiniezione non si è dimostrata efficace. Le punte sottili degli aghi si spezzano facilmente e altrettanto frequentemente si otturano. La trasformazione di una cellula per volta è un'operazione noiosa e difficile, non praticabile su scala commerciale. Inoltre, una volta che il DNA sia stato iniettato, non è affatto certo che avvenga la sua incorporazione nel genoma della cellula ricevente. Si dovrebbe iniettare DNA in almeno 10 000 cellule per avere la certezza che almeno una di esse assuma il nuovo gene.

Per aumentare il rendimento nel trasferimento dei geni, John C. Sanford della Cornell University ha studiato un modo per bombardare con materiale genetico molte cellule vegetali. Rivestendo di DNA piccole particelle di metallo, del diametro di uno o due micrometri, e sottoponendole a sufficiente accelerazione, si può penetrare attraverso le pareti di cellule intatte, veicolando così il materiale genetico. Dato che i piccoli fori nella parete e nella membrana plasmatica della cellula si richiudono rapidamente da soli, le lesioni prodotte sono temporanee e non compromettono in modo irreversibile l'integrità della cellula. Pur rimanendo nel citoplasma, le particelle sono troppo piccole per interferire con qualunque funzione cellulare.

Nel 1987, Sanford e il suo collaboratore Theodore M. Klein hanno costruito un pratico dispositivo che utilizza particelle di tungsteno per «impallinare» le cellule vegetali. Questo «cannone a particelle di DNA», come è stato soprannominato, utilizza come carica di sparo una cartuccia a salve calibro 22. I ricercatori dell'Agracetus, a Middleton, nel Wisconsin, hanno costruito un congegno analogo, ricorrendo a particelle d'oro «sparate» mediante la vaporizzazione di una gocciolina d'acqua.

Entrambi i «cannoni» hanno consentito di produrre piante transgeniche. Nel 1991, un gruppo della DeKalb Plant Genetics, a Groton, nel Connecticut, e Charles L. Armstrong della Monsanto, in collaborazione con Michael E. Fromm, allora allo US Department of Agriculture ad Albany, in California, hanno messo a punto indipendentemente sistemi di bombardamento, efficienti e precisi, per trasformare il mais. In un periodo più recente, il nostro gruppo di ricerca ha avuto occasione di collaborare con il laboratorio di Indra Vasil, all'Università della Florida, a Gainesville, per trasformare piante di frumento.

L'introduzione del DNA nelle cellule è solo la prima tappa nel processo di trasformazione delle piante. Per produrre un fenotipo utile, ovvero una varietà vegetale che possieda i caratteri desiderati, i ricercatori dovranno ancora manipolare i frammenti di materiale genetico. Questo compito è facilitato dalla natura modulare dei geni: i geni che co-

La fotografia aerea all'infrarosso, ripresa sull'Oregon, mostra un campo irrigato con un sistema a perno centrale dove vengono attuate colture sperimentali. Si possono distinguere i settori in cui la coltura è stata manipolata geneticamente per dotarla di resistenza alla dorifora. Il parassita ha defoliato le piante normali, lasciando dietro di sé solo il terreno (*in verde*), ma ha evitato le piante che producono una proteina insetticida (*in rosso*). Nei lotti bianchi è in corso un altro esperimento.

dificano per le proteine (e, in pratica, consentono alla cellula di produrle) sono costituiti da tre sole regioni.

La prima regione è il promotore, una sequenza che contribuisce a specificare il luogo e il tempo dell'espressione genica. La seconda è una regione codificante, portatrice dell'informazione che determina la natura della proteina prodotta dal gene. Infine, vi è la cosiddetta regione di poliadenilazione (poli-A), che assicura la fine corretta della trascrizione in RNA messaggero.

Il ricercatore dispone quindi di un considerevole margine di manovra per mescolare e assortire queste regioni. L'assemblaggio dei componenti di differenti geni produce quelli che sono comunemente noti come geni chimerici. In teoria, la regione codificante del gene chimerico può provenire da qualsiasi organismo. Questa inusitata flessibilità è il principale vantaggio dell'ingegneria genetica rispetto ai metodi tradizionali, che possono trasferire geni soltanto tra specie molto affini. Inoltre, scegliendo vari promotori, i ricercatori possono indirizzare geni con una particolare espressione su organi specifici, come foglie, radici, semi e tuberi, e, in molti casi, su tipi cellulari particolari all'interno di questi tessuti complessi.

Uno dei caratteri più promettenti che la tecnica di trasferimento dei geni offre è la resistenza alle malattie. I risultati più entusiasmanti sono stati raggiunti con la produzione di piante resistenti ai virus. Si tratta di una acquisizione importante, dal momento che oggi non disponiamo di alcun metodo diretto di cura per le colture infettate da virus. La maggior parte delle infezioni riduce il rendimento delle colture; talvolta, però, alcune hanno effetti addirittura catastrofici. Certe pratiche agricole valide, come la rotazione delle colture e la rimozione delle erbe infestanti e dei residui delle colture, possono riuscire a contenere l'attacco dei virus, ma solo parzialmente. Talvolta, per tenere sotto controllo gli insetti responsabili della trasmissione dei virus, vengono impiegati insetticidi.

La ricerca genetica sulla resistenza ai virus poggia su indagini di base preliminari nel campo della biologia vegetale. Da lungo tempo era stato osservato che l'infezione di una pianta da parte di un ceppo virale non molto virulento è in grado di proteggere la pianta stessa da un'infezione successiva, compiuta da un ceppo più virulento. Chiaramente, la replicazione del ceppo poco virulento interferisce con l'infettività del ceppo virulento. Infettando intenzionalmente piante di pomodoro, coltivate in serra, con virus poco virulenti si è quindi riusciti a proteggere queste piante dal contagio.

Roger N. Beachy e collaboratori, alla Washington University, hanno arguito che responsabile della protezione potesse essere una singola componente del virus. In collaborazione con Stephen Rogers della Monsanto e con uno di noi (Fraley), essi hanno costruito un vettore per introdurre e fare esprimere in piante di tabacco e di pomodoro il gene per la proteina del capside del virus del mosaico del tabacco. In queste piante così modificate è stata quindi inoculata una forte concentrazione del virus. È stato constatato che esse avevano acquisito una notevole resistenza alla infezione virale, confermando così l'ipotesi di Beachy riguardo alla protezione virale.

Esperimenti successivi hanno dimostrato che l'espressione del gene per la proteina del capside del virus del mosaico del tabacco conferisce resistenza soltanto ai ceppi di quel virus e di pochi altri virus affini. Ciononondimeno, il meccanismo sembra avere un'applicabilità generale: per quasi tutti i virus vegetali, l'espressione del gene della proteina del capside protegge, a un livello sufficientemente elevato, dall'infezione prodotta da quel virus. Sempre mediante le tecniche dell'ingegneria genetica, si è riusciti a indurre, in una vasta gamma di specie coltivate, una tolleranza significativa a più di una decina di differenti virus vegetali.

Le piante transgeniche sono prodotte in due modi. Se si usa *Agrobacterium*, il DNA con il carattere desiderato viene inserito nel plasmide del batterio che induce la formazione tumorale. Questo infetta la cellula vegetale e trasferisce il DNA. Quando si ricorre al «bombardamento» con particelle, sferule di metallo rivestite di DNA sono sparate all'interno della cellula. In entrambi i casi, la cellula vegetale incorpora il DNA nel proprio cromosoma per poi rigenerare piante intere.

Il «cannone a particelle di DNA», ideato da John C. Sanford della Cornell University, spara nelle cellule vegetali minuscole particelle di tungsteno rivestite di DNA. Le particelle sono contenute in un «proiettile» di plastica che viene accelerato da una piccola carica di polvere da sparo. La piastra sulla bocca del cannone blocca il proiettile mentre la quantità di moto scaglia le particelle all'interno del bersaglio. Gli sfiatatoi permettono all'aria che si trova dinnanzi al proiettile di sfuggire.

La resistenza all'attacco degli insetti è un altro importante obiettivo dell'ingegneria genetica, specialmente per quanto riguarda le piante di cotone, di patata e di mais. Negli ultimi trent'anni, orticoltori e agricoltori hanno fatto ricorso al *Bacillus thuringiensis*, che produce una proteina insetticida. I preparati di *B. thuringiensis* più frequentemente usati sono estremamente specifici per le larve dei lepidotteri (sia diurni sia notturni), che sono agenti infestanti importanti. Le proteine di *B. thuringiensis* si legano a recettori specifici, localizzati sulle membrane dell'apparato digerente degli insetti bersaglio. Tale legame interferisce con il trasporto ionico nelle cellule epiteliali del suddetto apparato, sconvolgendo così la capacità dell'insetto di alimentarsi. Questi insetticidi naturali non hanno alcuna tossicità per i mammiferi o, addirittura, per qualunque altra specie di insetti.

L'utilità degli insetticidi contenenti *B. thuringiensis* è spesso limitata dalla facilità con cui questi prodotti vengono dilavati dalle piante. Inoltre, l'efficacia sul campo ha solo una breve durata. Alla metà degli anni ottanta, gli esperti di ingegneria genetica che lavoravano presso grandi società come la Plant Genetic Systems di Gand, in Belgio, l'Agrigenetics, l'Agracetus e la Monsanto, negli Stati Uniti, sono riusciti a isolare con successo dal batterio i geni per le proteine dotate di proprietà insetticide. Per inserire i geni nelle piante di pomodoro, patata e cotone essi sono ricorsi ad *A. tumefaciens* e al «cannone a particelle di DNA». All'inizio, i geni si esprimevano scarsamente e le proteine di *B. thuringiensis* che la pianta produceva uccidevano solo gli insetti di laboratorio più sensibili.

David A. Fischhoff e Frederick J. Perlak della Monsanto sono riusciti a rendere più efficace il procedimento riprogettando il gene batterico originale per imitare maggiormente le sequenze nucleotidiche della pianta. Tali cambiamenti hanno potenziato in modo spettacolare il controllo sugli insetti. Due anni di prove sul campo hanno confermato che la presenza di questi geni di *B. thuringiensis* all'interno di piante di cotone ha tenuto efficacemente sotto controllo tutte le larve infestanti di lepidottero, tra cui quelle di *Heliothis zea*. Queste piante manipolate geneticamente dovrebbero permettere di ridurre di circa il 40-60 per cento il consumo di insetticidi sulle colture di cotone.

Visto il successo dell'esperimento, si è perlustrato in lungo e in largo l'ambiente naturale alla ricerca di ceppi di *B. thuringiensis* efficaci su insetti diversi dalle larve di lepidottero. Uno di questi ceppi ha indotto a riprogettare un gene efficace contro la dorifora della patata (*Leptinotarsa decemlineata*). Nell'estate del 1991, piante di patata Russet Burbank, che esprimevano un gene per il controllo di questo insetto, sono state sottoposte a verifica in parecchie località, dal Maine all'Oregon: è stato trovato che esse erano fondamentalmente immuni ai danni provocati dalla dorifora.

B. thuringiensis potrà continuare a offrire geni per il controllo degli agenti infestanti delle piante. Scienziati della Mycogen Corporation di San Diego, in California, hanno scoperto geni di *B. thuringiensis* attivi contro i nematodi delle piante e ne hanno identificati altri, della stessa fonte, attivi contro le zanzare. Alcuni ricercatori stanno oggi tentando di far produrre dalle alghe la proteina con attività zanzaricida, come mezzo per controllare la malaria.

La specificità per il bersaglio e la localizzazione all'interno dei tessuti della pianta fanno in modo che l'attività della proteina di *B. thuringiensis* si eserciti soltanto contro gli insetti predatori. Contrariamente a quanto avviene con gli insetticidi topici, le proteine insetticide presenti all'interno della pianta non possono essere asportate dalla pioggia. Tale prerogativa è confermata da ampie prove tossicologiche sulle proteine di *B. thuringiensis* e dall'esperienza acquisita in oltre trent'anni di impiego dei prodotti ottenuti da *B. thuringiensis*. In effetti, molti ricercatori considerano questi ultimi gli insetticidi più sicuri del mondo. Inoltre, la proteina di *B. thuringiensis*, che rappresenta meno dello 0,1 per cento delle proteine totali nelle piante modificate, viene demolita esattamente alla stessa stregua di qualsiasi altra proteina, sia nel terreno sia nell'apparato digerente.

Oltre alla minaccia dei virus e degli insetti, le colture devono far fronte a un'altra sfida: quella posta dalle piante infestanti, che competono con quelle utili per quanto riguarda l'acqua, le sostanze nutritive e la luce solare. Esse possono ridurre del 70 per cento la resa potenziale di un campo. Inoltre, le piante infestanti mescolate con il raccolto ne riducono il valore commerciale in misura significativa. Infine, possono costitui-

re un accogliente habitat per gli agenti patogeni.

Nella maggior parte dei casi, combinando l'impiego di erbicidi con una coltivazione accurata si riescono a controllare in maniera efficace le piante infestanti. Ma, poiché un erbicida ha uno spettro di azione limitato, che interessa solo una piccola percentuale di infestanti, durante la stagione di crescita è necessario ricorrere a parecchi tipi di prodotti chimici.

L'ingegneria genetica può offrire una alternativa parziale a un simile controllo. La strategia consiste nel produrre piante che siano in grado di tollerare l'esposizione a un unico erbicida ad ampio raggio, sicuro per l'ambiente. In contrasto con le opinioni espresse da alcuni critici dell'ingegneria genetica, l'impiego di piante con tolleranza per gli erbicidi potrà effettivamente ridurre la quantità complessiva di erbicidi utilizzati.

Disponiamo di due metodi di carattere generale per conferire alle piante, mediante manipolazione genetica, la tolleranza agli erbicidi. Ricercatori della Monsanto e della Calgene di Davis, in California, lavorano da tempo per riuscire a indurre nelle piante la tolleranza al glifosato, ingrediente attivo di un erbicida di nome Roundup, composto a largo spettro, in grado di controllare sia le graminacee infestanti sia qualunque dicotiledone infestante. Il Roundup provoca la morte di queste piante, inibendo l'attività della EPSP-sintetasi, un enzima necessario per la produzione degli amminoacidi aromatici, di cui la pianta ha assoluto bisogno per crescere.

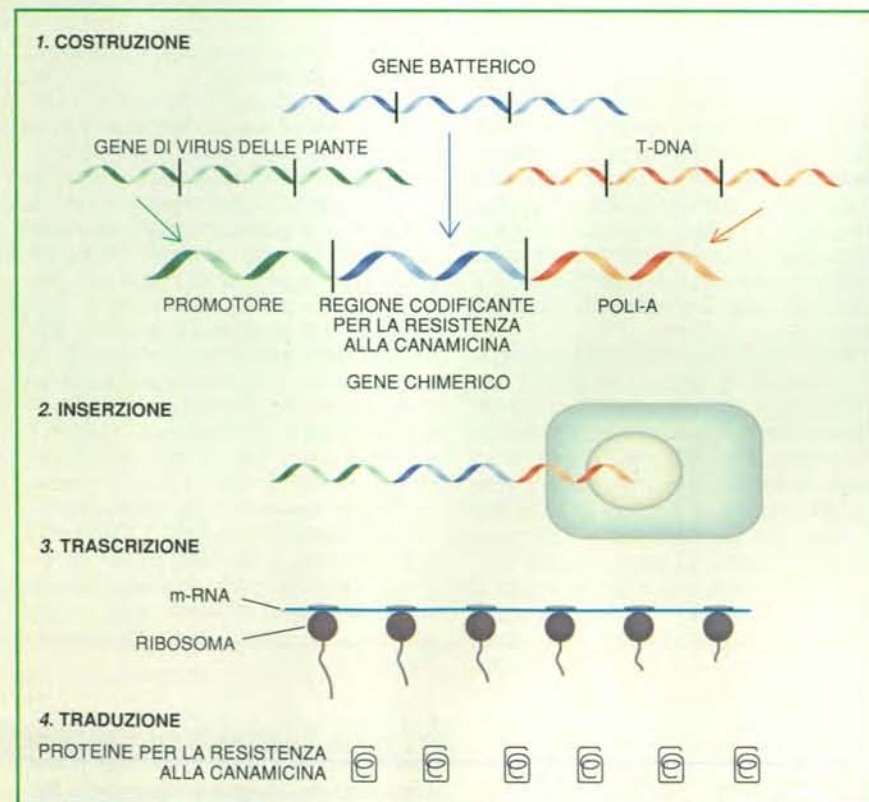
Gli esperti di ingegneria genetica mostrano un particolare interesse per il Roundup, uno degli erbicidi più accettabili dal punto di vista ambientale: non ha effetti sugli animali, dato che questi non metabolizzano gli amminoacidi aromatici; per di più, si decompone rapidamente, dando origine a composti naturali innocui.

La prima fase nello sviluppo della tolleranza al Roundup si è svolta nel 1983, quando gruppi diretti da Luca Comai e David M. Stalker della Calgene e da Rogers e Ganesh Kishore della Monsanto hanno isolato i geni della EPSP-sintetasi da piante e batteri. Essi hanno anche identificato varianti dei geni che producono proteine con una sensibilità ridotta al Roundup. In seguito, altri ricercatori sono stati in grado di costruire geni che producevano nelle piante elevate quantità di queste proteine. Questi geni sono stati successivamente introdotti in piante di pomodoro, di soia, di cotone, di ravizzone e in altri tipi di piante coltivate. Come è stato dimostrato da prove sul campo, eseguite negli ultimi tre anni negli Stati Uniti, in Canada e in Europa, le colture manipolate geneticamente sono state in grado di sopportare trattamenti con Roundup a livelli che offrono un controllo efficace delle erbe infestanti. Ricercatori della Du Pont sono ricorsi a un procedimento tecnicamente simile per sottoporre a manipolazione genetica piante in grado di tollerare certi tipi di erbicidi come la sulfonilurea.

Alcuni ricercatori della Plant Genetic Systems di Gand, in Belgio, e della Hoechst, in Germania, hanno affrontato in modo diverso il problema della tolleranza agli erbicidi. Hanno isolato da *Streptomyces hygroscopicus* un gene responsabile della sintesi di un enzima che inattiva l'erbicida Basta, il quale influisce sulla via metabolica della glutamminsintetasi nelle piante infestanti, interferendo così sulla crescita di queste. Le piante coltivate che possiedono il gene inattivano l'erbicida prima di venire danneggiate. Prove sul campo effettuate su piante che tollerano il Basta dimostrano l'efficacia della protezione.

La tolleranza all'erbicida, introdotta nelle piante mediante manipolazione genetica, offre all'agricoltore un'alternativa più economica ed efficace alle misure convenzionali di controllo delle piante infestanti. Una selezione accurata degli erbicidi a largo spettro dovrebbe portare complessivamente a una diminuzione nell'impiego delle sostanze chimiche per il controllo delle piante infestanti e dovrebbe consentire agli agricoltori di sostituire gli erbicidi oggi in uso con prodotti meno nocivi per l'ambiente.

Ulteriori progressi nella semplificazione e nell'ampliamento del raggio d'azione delle tecniche di ingegneria genetica, assieme a una maggiore conoscenza della biologia delle piante, promettono di estendere notevolmente i vantaggiosi cambiamenti che il trasferimento di geni può consentire. Per esempio, sono già stati identificati e isolati parecchi geni che svolgono un ruolo nella biosintesi dell'etilene, la molecola segnale che innesca la maturazione dei frutti. Un ritardo nel deterioramento dei frutti permetterebbe di effettuare la raccolta in uno stadio più tardivo rispetto a quello in cui avviene attualmente, il che potrebbe far migliorare il sapore e perfino il valore nutritivo del prodotto.

Per allungare la vita commerciale dei frutti, sono stati elaborati due metodi. Il primo consiste nell'inserire le cosiddette versioni antisenso dei geni responsabili della maturazione. Le molecole antisenso si legano a un RNA messaggero specifico per disattivare i geni. Athanasios Theologis dello US Department of Agriculture ad Albany, in California, e Don Grierson dell'Università di Nottingham hanno dimostrato che i frutti delle piante

Geni chimerici possono essere ottenuti a partire da geni ricavati da differenti organismi. Qui il gene chimerico per la resistenza alla canamicina proviene da fonti diverse: il promotore da un virus delle piante, la regione codificante da *Escherichia coli* e il sito poli-A dal DNA trasferito (T-DNA) di *Agrobacterium* (*1*). Dopo che il gene chimerico è stato inserito in una cellula vegetale (*2*), viene trascritto nell'RNA messaggero (m-RNA) (*3*). I ribosomi traducono l'm-RNA, producendo proteine (*4*).

SPECIE MODIFICATE GENETICAMENTE

ABETE	CETRIOLO	MELANZANA	PISELLO
ASPARAGO	COTONE	MELO	POMODORO
AVENA	ERBA MEDICA	MELONE	RAFANO
BARBABIETOLA DA ZUCCHERO	FRAGOLA	MIRTILLO	RAVIZZONE
BROCCOLO	FRUMENTO	NOCE	RISO
CANNA DA ZUCCHERO	GIRASOLE	PAPAYA	SEDANO
CAROTA	GRANOTURCO	PATATA	SOIA
CAVOLFIORE	KIWI	PATATA AMERICANA	SUSINO
CAVOLO	LAMPONE	PEPE	TABACCO
	LATTUGA	PIOPPO	VITE
	LINO		

Le piante trasformate mediante manipolazione genetica, riprodotte alla sinistra delle rispettive controparti normali, includono piante di cotone, tolleranti agli erbicidi (*a*), piante di tabacco, resistenti agli insetti (*b*) e piante di pomodoro, i cui frutti resistono al deterioramento (*c*). L'elenco indica le specie in cui l'ingegneria genetica è stata applicata con successo.

di pomodoro dotati di geni antisenso si mantengono sodi più a lungo. Seguendo un procedimento diverso, Kishore e Harry Klee della Monsanto hanno introdotto in piante di pomodoro un gene che le induce a produrre un enzima. Questo decompone i precursori che formano l'etilene, ritardando così il deterioramento dei frutti.

Con l'ingegneria genetica è addirittura possibile migliorare la qualità dei prodotti agricoli: sono stati isolati geni che codificano per proteine dalle proprietà nutrizionali superiori e che dovrebbe essere possibile inserire in piante coltivate. Si potrebbero anche ottenere piante «su misura», che producano sostanze chimiche speciali, come amidi, oli industriali, enzimi e perfino farmaci. Sono attualmente in corso prove preliminari.

Sono state finora eseguite, negli Stati Uniti e in Europa, oltre 400 prove sul campo di piante manipolate geneticamente. Esse confermano l'intrinseca sicurezza e validità commerciale di questi procedimenti. Le colture contenenti i caratteri sopra descritti dovrebbero essere disponibili per gli agricoltori verso la metà degli anni novanta. Vi sono nondimeno alcune limitazioni. In termini pratici, l'ingegneria genetica può modificare soltanto caratteri espressi da non più di tre-cinque geni. Inoltre, alcune colture non rispondono ai metodi attuali di trasferimento dei geni e talvolta è difficile isolare geni utili.

Eppure, a molti di coloro che lavorano nel settore della biotecnologia delle piante, questi problemi sembrano molto più facilmente risolvibili di quelli non tecnici. Le colture manipolate geneticamente vengono prodotte in un momento in cui il sostegno sia pubblico sia politico per la ricerca agraria è, in genere, tiepido. Le preoccupazioni riguardanti la sicurezza dei cibi e l'impatto ambientale dell'agricoltura si sono unite a una infrastruttura agricola in rapido mutamento e alla scarsa conoscenza delle nuove tecnologie per far passare in seconda linea la necessità di ottenere prodotti alimentari economici e di elevata qualità. La produzione alimentare mondiale dovrà triplicarsi nei prossimi 40 anni per poter far fronte al fabbisogno di una popolazione mondiale stimata in nove miliardi di individui. La biotecnologia è una delle poche soluzioni nuove a questo immenso problema.

Un altro importante vantaggio dell'ingegneria genetica delle piante è quello di offrire agli agricoltori la tecnologia più recente nella più tradizionale delle confezioni: il seme. In questo modo anche le nazioni più povere avranno accesso ai benefici senza dover fare ricorso all'alta tecnologia o a materiali costosi. Pur non essendo un rimedio per ogni problema, la biotecnologia promette di diventare una componente importante dell'agricoltura, in tutto il mondo.

BIBLIOGRAFIA

Field Testing Genetically Modified Organisms: Framework for Decisions, National Academy Press, 1989.

GASSER CHARLES S. e FRALEY ROBERT T., *Genetically Engineering Plants for Crop Improvement* in «Science», 244, pp. 1293-1299, 16 giugno 1989.

KUNG SHAIN-DOW e ARNTZEN CHARLES J. (a cura), *Plant Biotechnology*, Butterworth Publishers, 1989.

GRIERSON DON (a cura), *Plant Genetic Engineering*, Chapman and Hall, 1991.

Il Codice Mendoza

Questo manoscritto, ricco di magnifiche illustrazioni eseguite da artisti aztechi su incarico dei conquistatori spagnoli, rappresenta una preziosa testimonianza diretta di una civiltà che stava inesorabilmente svanendo

di Patricia Rieff Anawalt e Frances F. Berdan

Hernán Cortés e i conquistadores che lo accompagnavano giunsero in Messico nel 1521, trovandovi una popolazione che aveva raggiunto un rilevante sviluppo culturale pur sulla base di conoscenze tecnologiche molto semplici. L'impero azteco era vasto e popoloso, dato che occupava tutto il Messico centrale da un oceano all'altro e comprendeva circa 20 milioni di persone. Più o meno un centesimo della popolazione viveva nella capitale, Tenochtitlán, che superava per dimensioni gran parte delle città europee di allora (e oggi, col nome di Città di Messico, sta rapidamente avviandosi a diventare la più grande metropoli del mondo).

I popoli mesoamericani impiegavano un sistema di scrittura pittografico che conosciamo grazie ai pochi volumi con fogli di corteccia o di pelle giunti fino a noi. I manoscritti venivano utilizzati per registrare genealogie e resoconti storici, per tenere una «contabilità» dei tributi e per fungere da manuali per le cerimonie e i riti divinatori e per la compilazione del calendario. Centinaia di questi codici, come vengono chiamati oggi, vennero dati alle fiamme poco dopo la conquista spagnola, vittime del fervore religioso dei predicatori; eppure, dopo solo pochi decenni, furono gli stessi frati spagnoli a dare l'incarico agli artisti indigeni di documentare gli aspetti principali di una civiltà che stava rapidamente scomparendo.

Il primo foglio del Codice Mendoza, riprodotto nella pagina a fianco, raffigura la fondazione della capitale azteca di Tenochtitlán, avvenuta nel 1325. Il glifo che è l'insegna della città - l'aquila posata su un cactus - è diventato lo stemma dell'attuale Messico. I templi incendiati e vacillanti sulla sommità di piramidi a gradini (*in basso*) rappresentano la conquista di due vicine città-stato.

Fra i codici di epoca coloniale, nessuno supera per splendore iconografico e ricchezza di contenuti il Codice Mendoza, compilato verso il 1541 a Città di Messico su 71 fogli di carta di manifattura spagnola, allo scopo di informare Carlo V di Spagna sui suoi nuovi ed esotici sudditi. A quanto pare il manoscritto fu realizzato per iniziativa del primo viceré del Messico, Antonio de Mendoza, che voleva ottenere un resoconto di prima mano, da testimoni che ricordavano l'epoca precedente alla conquista spagnola, sul modo di vita degli aztechi.

La compilazione del Codice fu un lavoro collettivo, come rivela l'esame del volume stesso. Tutte le pagine illustrate sono di mano di un solo pittore principale, mentre un certo numero di assistenti aveva senza dubbio preparato i pigmenti e steso le campiture piatte di colore. Indigeni che avevano vissuto gran parte della propria vita sotto il dominio azteco diedero un'interpretazione delle illustrazioni in nahuatl, la lingua azteca che fungeva da lingua franca nella Mesoamerica; questi commenti vennero poi tradotti in spagnolo e trascritti nelle pagine a fronte delle illustrazioni da un ecclesiastico.

Il viceré Mendoza affermò, in una lettera datata 6 ottobre 1541, che il sacerdote incaricato di compilare il volume si era basato sulle conoscenze di «molti signori di ciascuna provincia», fra i quali vi era stata una considerevole divergenza di opinioni. Le conseguenti incertezze frustrarono il povero scriba, che nell'ultima pagina del Codice si scusa per alcuni errori frettolosamente corretti e si lamenta di non aver avuto abbastanza tempo per finire adeguatamente il lavoro: «La colpa di tutto ciò è degli Indiani, che sono stati lenti nel giungere a un accordo.»

La ristrettezza del tempo a disposizione era dovuta al fatto che il documento doveva essere spedito prima della stagione degli uragani. Pertanto il compilatore si affrettò a completare i fogli in modo che potessero essere trasportati a dorso di mulo lungo i 400 chilometri di pista che, con un dislivello di circa 2000 metri, scendeva tortuosamente fino al porto di Veracruz, da dove ogni anno partiva la flotta carica di tesori.

Il Codice Mendoza non arrivò mai in Spagna. Lungo il tragitto attraverso l'Atlantico il galeone che lo trasportava venne catturato da una nave da guerra francese e tutto il suo prezioso carico fu inviato alla corte di Enrico II di Francia. Qui il documento giunse in possesso del geografo reale, Andrés Thevet, un ecclesiastico la cui firma appare tre volte nei 71 fogli.

Dopo la morte di Thevet, il Codice Mendoza fu acquistato per la somma di 20 corone francesi da Richard Hakluyt, cappellano dell'ambasciatore inglese in Francia, che lo portò in patria. Dopo il 1616 il manoscritto giunse in possesso di Samuel Purchas, compilatore di resoconti di viaggio; il figlio di Purchas vendette a sua volta il Codice a John Selden, celebre collezionista di manoscritti del Nuovo Mondo. Nel 1659, cinque anni dopo la sua morte, il Codice Mendoza fu trasferito alla Bodleian Library dell'Università di Oxford. Il suo fondatore, Sir Thomas Bodley, si era prefisso di raggiungere la più alta qualità possibile nella collezione donata al suo ateneo; dichiarò infatti recisamente che gli scaffali della biblioteca non dovevano essere affollati da libri messi lì «per far numero». (Fu solo un decennio dopo la morte di Bodley, avvenuta nel 1613, che la prima edizione *in folio* delle opere di Shakespeare entrò alla Bodleian Library.)

Il Codice Mendoza, giunto finalmente al termine delle sue peripezie, venne dimenticato per circa 170 anni. Autorevoli studiosi del Nuovo Mondo come Francisco Javier Clavijero e Alexander von Humboldt - entrambi interessati alle rappresentazioni figurative legate alle tradizioni indigene messicane - non sapevano

Le vittorie di Itzcoatl (*qui a sinistra*) sono commemorate dai glifi di località degli 11 centri da lui conquistati durante gli anni del suo regno. I glifi circondano l'immagine dell'imperatore, che appare seduto di fronte all'emblema marziale di Tenochtitlán, uno scudo recante palle di piume sovrapposto a tre dardi e un propulsore. Il glifo a ricciolo posto davanti alla bocca dell'imperatore simboleggia l'atto del parlare.

L'elenco dei tributi della provincia di Tochtepec (*pagina a fronte*), sulla costa del Golfo del Messico, contiene 22 glifi di località (*da sinistra in alto, in senso antiorario*). Gli ideogrammi raffiguranti pezze di tessuto (*in alto*) sono accompagnati da un contrassegno, a indicare che ogni anno ne dovevano essere consegnate 2800. Più sotto compaiono un costume da guerriero ricoperto di piume con un'insegna dorsale a forma di quetzal, scudi, un'insegna dorsale di piume gialle, diademi e collane d'oro, file di perline di nefrite, penne di uccelli tropicali di vari colori e fagotti di semi di cacao.

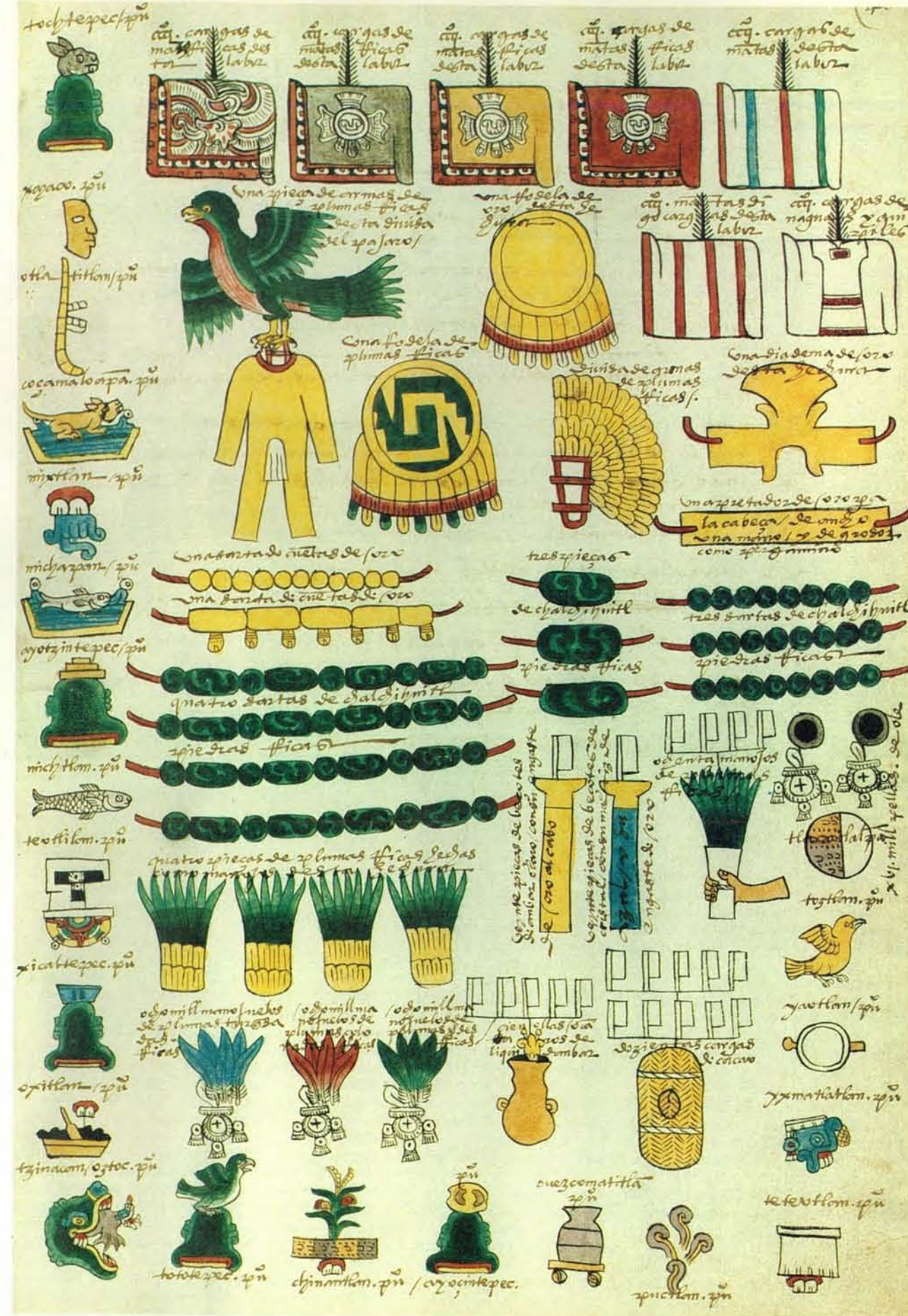
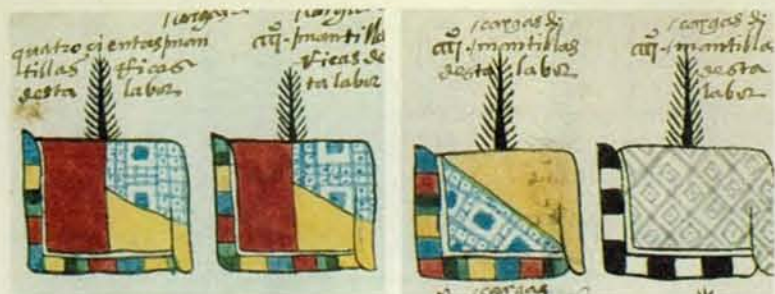
affatto dove fosse conservato il manoscritto. Il Codice venne finalmente portato all'attenzione degli studiosi nel 1831, quando il visconte di Kingsborough ebbe la fortuna di scoprire un riferimento al riguardo in un inventario del patrimonio di Thevet. Egli fu colpito a tal punto dal Codice che lo descrisse per primo nella sua monumentale serie in nove volumi *Antiquities of Mexico*, pubblicata fra il 1831 e il 1848.

Un secolo dopo, lo splendido, ma evidentemente sfortunato, Codice Mendoza venne pubblicato da Waterlow and Sons Limited, con il commento di James Cooper Clark; purtroppo quasi tutti gli esemplari di questa edizione andarono distrutti nei bombardamenti tedeschi su Londra del 1940. (Una nuova edizione in quattro volumi, curata dalle autrici di questo articolo, è in corso di pubblicazione da parte della University of California Press.)

Il Codice Mendoza si può suddividere in tre parti. I primi 19 fogli narrano le conquiste dei mexica di Tenochtitlán (è questo il nome con cui gli aztechi indicavano se stessi); i successivi 37 fogli specificano i tributi dovuti da ognuna delle 38 province dell'impero (alcuni degli elenchi occupano all'incirca un singolo foglio); gli ultimi 15 fogli forniscono una descrizione di interesse etnografico del ciclo di vita degli aztechi.

Sebbene Tenochtitlán fosse il centro dominante dell'impero azteco, altre due città - Texcoco e Tlacopán - avevano il ruolo di partner a livello quasi paritario. Negli anni quaranta Robert H. Barlow dell'Università della California a Berkeley definì questo ordinamento politico «triplice lega». Il termine «aztechi», d'altra parte, fu introdotto nel 1813 da von Humboldt, che lo mutuò da Aztlan, il nome della patria leggendaria dei mexica. Trent'anni dopo William H. Prescott contribuì a diffondere questo neologismo con la sua opera *The Conquest of Mexico*.

La prima pagina illustrata del Codice Mendoza raffigura, riunendo fatti reali e leggendari, la fondazione di Tenochtitlán, avvenuta nel 1325. Secondo il mito, i mexica erano in origine cacciatori-raccoglitori nomadi che vivevano nei deserti del Messico settentrionale. Poi, all'inizio del XII secolo, cominciarono a migrare verso sud, ultimi di una serie di popolazioni che andarono a stabilirsi nella Valle di Messico. L'unico luogo del bacino lacustre in cui potevano insediarsi era un isolotto assai poco salubre, in mezzo alle paludi, ma qui i mexica trovarono il presagio indicato loro dal dio Huitzilopochtli: un'aquila appollaiata su un cactus cresciuto su una roccia. Questo incontro leggendario ispirò il glifo di località di Tenochtitlán, «In mezzo al Frutto del Cactus-di-Pietra», che, con l'aggiunta di un serpente nel becco dell'aquila, è oggi lo stemma nazionale del Messico.

Nel 1519 l'isolotto palustre si era ormai trasformato in una metropoli di 200 000 abitanti, suddivisa in zone distinte da una rete di canali intersecantisi. L'illustrazione ne mostra anacronisticamente suddivisa in quattro quadranti, uno dei quali contiene una rastrelliera per esporre crani: è l'unico riferimento esplicito del Codice Mendoza alla prati-

Un disegno esclusivo di quadrati con punti centrali, che attesta un alto lignaggio, appare in alcuni tessuti raffigurati nel Codice Mendoza; lo stesso motivo orna il mantello di Nezahualpilli, re di Texcoco, ritratto nel Codice Ixtlilxochitl. Le 11 province che avevano il diritto di offrire come tributo questi tessuti corrispondono a regni più antichi (*nella pagina a fronte*) i cui sovrani facevano risalire la propria ascendenza ai venerati toltechi.

ca azteca del sacrificio umano di massa.

Questo primo foglio è delimitato da un bordo in cui sono elencati i 51 anni di regno del capo delle tribù immigrate, Tenoch, mentre due vignette nella parte bassa della pagina vantano conquiste decisamente improbabili: se si crede all'illustrazione, i mexica, nei primi difficili anni successivi alla migrazione, sarebbero riusciti a conquistare Colhuacan e Tenayucan, due comunità fondate nel XIV secolo nella Valle di Messico e ormai consolidate e potenti. Il simbolo della conquista, un tempio incendiato e vacillante alla sommità di una piramide a gradini, compare a fianco del glifo di località di ciascuna comunità sottomessa.

È proprio nei glifi di località che si rivelano i diversi livelli di complessità della scrittura azteca. Nella sua versione più semplice, il sistema è pittografico: la figura di un uomo che caccia significa semplicemente «cacciatore». Il passo successivo verso l'astrazione è l'ideogramma, ossia un'immagine che rappresenta un concetto. L'ideogramma dell'orma di un piede indica un cammino, e quindi una direzione o un viaggio. Il livello più astratto è quello fonetico, dove i caratteri rappresentano suoni anziché immagini o concetti. È il principio che si applica nei rebus e sta alla base di molti glifi di località aztechi.

Per esempio, il glifo della località *Tochpan* è formato combinando la parola *tochtli* (coniglio) con un suffisso indicante un luogo. In nahuatl *pan* significa «su, alla sommità di, al di sopra»; ma nell'illustrazione questo suffisso, per l'identità di suono, è rappresentato dalla parola *pantli* (bandiera o stendardo). Il risultato della combinazione di *tochtli* e *pantli* è una sorta di rebus: una bandiera sopra un coniglio, ossia *Tochpan*, «Luogo del Coniglio». (Questo animale aveva una connotazione religiosa, essendo legato alla Luna, alla fecondità e all'ebbrezza.)

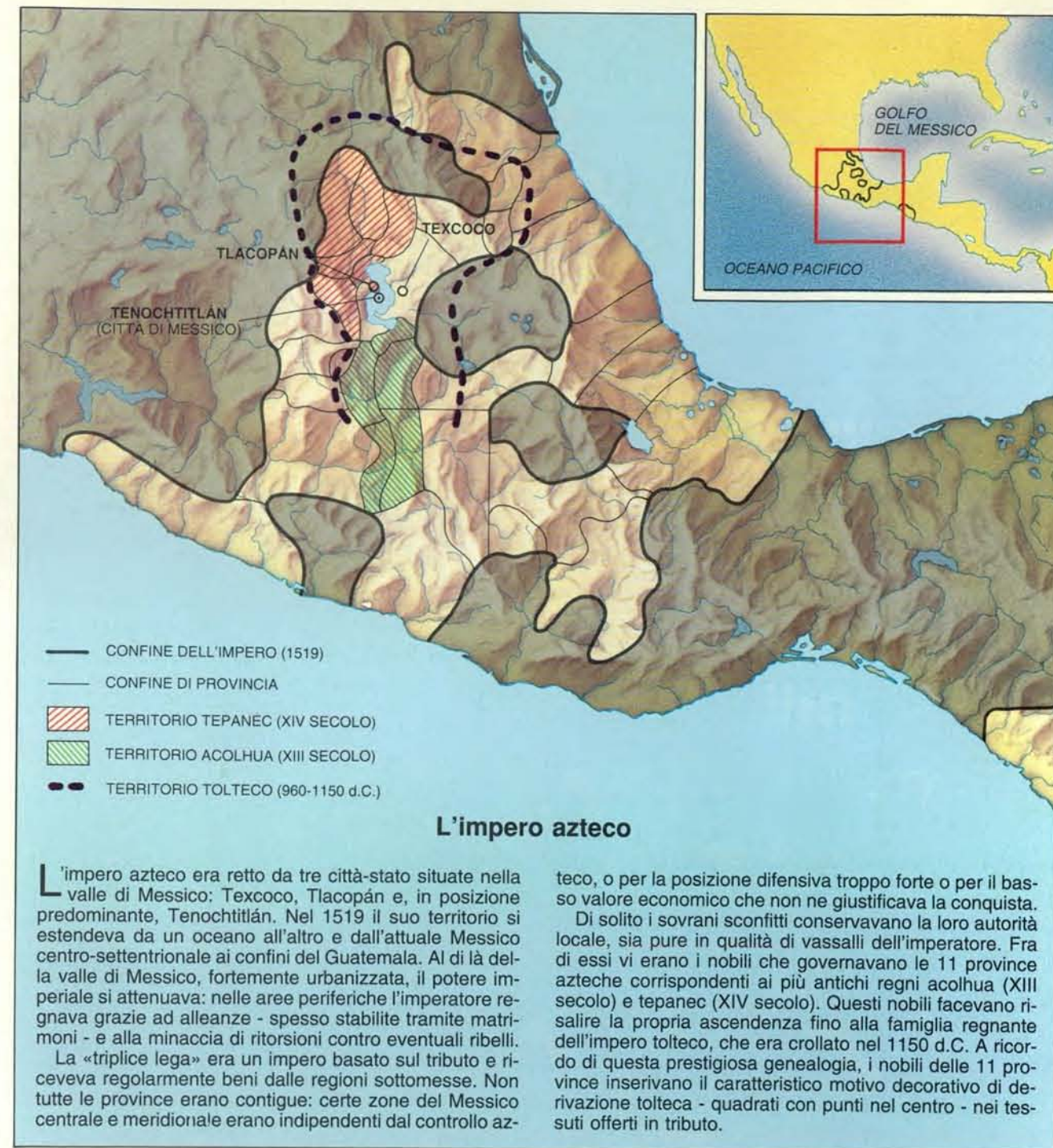
Molti dei glifi di località del Codice Mendoza appaiono nella sezione storica, dove rappresentano le conquiste che venivano considerate gli eventi più significativi del regno di un monarca. Questi 19 fogli sono in realtà resoconti di vittorie anziché cronache di avvenimenti. Nel Codice il regno di ciascuno dei nove imperatori aztechi è presentato in maniera identica: il sovrano siede di fronte al simbolo marziale di Tenochtitlán, uno scudo recante palle di piume sovrapposto a tre dardi e a un propulsore. Gli anni di regno dell'imperatore sono indicati alle sue spalle, mentre egli è circondato dai glifi delle comunità conquistate.

Mentre la parte storica mette l'accento sull'espansione del territorio dell'impero, la successiva sezione sui tributi ne evidenzia la prosperità. Quello azteco può essere definito un impero basato sul tributo, in quanto l'autorità centrale non occupò mai in permanenza alcuna delle 38 province, né trasferì con la forza le popolazioni assoggettate.

Questo tipo di strutturazione dell'impero riflette la concezione mesoamericana della guerra, il cui scopo era non di annientare il nemico, ma di sottometterlo. Come testimonia il glifo che rappresenta la conquista, il primo obiettivo strategico era la distruzione del tempio principale dell'avversario; la riuscita di questa impresa veniva interpretata come un segno del volere divino, a indicare che le ostilità dovevano cessare per lasciare il posto alle trattative sul tributo.

A ogni conquista riuscita, gli aztechi guadagnavano nuovo territorio, sudditi e risorse economiche in forma di tributi; la gestione di tutto questo patrimonio richiedeva un sistema formale di contabilità. Oggi sappiamo che la seconda parte del Codice Mendoza rappresenta i tributi inviati a Tenochtitlán negli anni immediatamente precedenti ai primi contatti con gli europei, dal 1516 al 1518.

I tributi che dovevano essere versati da ciascuna provincia sono rappresentati in maniera standard. I glifi di località delle città tributarie sono allineati ai margini della pagina; ciascuna provincia prende il nome dalla prima comunità dell'elenco. Gli ideogrammi rettangolari nella parte alta della pagina rappresentano pezze di tessuto e sono seguiti dagli elaborati costumi ornati di piume che servivano da «uniforme» per i guerrieri aztechi. Al di sotto di questo sfarzoso apparato guerresco appaiono spesso contenitori pieni di alimenti, fra cui mais, fagioli e semi di amaranto, oltre a beni esotici quali pelli di giaguaro, aquile vive, fagotti di semi di cacao e tubi da fumo.

Gli oggetti più preziosi erano i gioielli in nefrite e le splendide penne del quetzal. Ci si potrebbe domandare in che modo la popolazione di questo uccello sia riuscita a sopravvivere alla forte richiesta di questo bene di lusso, ma gli aztechi, al contrario degli europei, sapevano conservare le loro risorse: catturavano i quetzal, strappavano loro le lunghe penne della coda e poi li liberavano in modo che potessero riprodursi e ricostituire gradualmente il loro piumaggio.

Le testimonianze dirette dei conquistadores dimostrano inequivocabilmente che i magnifici costumi ornati di piume e le imponenti insegne dorsali erano veramente portati in combattimento dai guerrieri aztechi per il loro valore psicologico: a ognuno di questi costumi era associato un complesso simbolismo religioso e indossarlo equivaleva a invocare il potere e la protezione della divinità alla quale facevano riferimento.

Negli elenchi dei tributi sono raffigurati 11 tipi diversi di costume da guerriero, ognuno rappresentante l'affiliazione religiosa di un particolare «reparto» dell'esercito azteco. La tenuta da combattimento che appare più frequentemente è il *cuextecatl*, il costume dei guerrieri huaxtechi. Questo abbigliamento, la cui principale caratteristica è il copricapo a punta, era offerto come tributo da 20 province culturalmente e geograficamente diverse, ma, cosa strana, non da quelle della regione huaxteca. Una parte del territorio huaxteco fu incorporato nelle province azteche di Tziccoac e Oxitipan. Forse il *cuextecatl* era la tenuta militare azteca predominante perché rappresentava il primo gradino al di sopra del costume riservato ai guerrieri novizi, una veste protettiva di cotone trapuntato che peraltro era così efficace da indurre anche i conquistadores ad adottarla rapidamente. Quando un giovane guerriero catturava il suo primo nemico in battaglia acquisiva il diritto di portare il *cuextecatl* al di sopra della veste protettiva.

Sembra che tutte le caratteristiche di derivazione huaxteca del *cuextecatl* - copricapo a punta, rosetta, «paraorecchi»

L'impero azteco

L'impero azteco era retto da tre città-stato situate nella valle di Messico: Texcoco, Tlacopán e, in posizione predominante, Tenochtitlán. Nel 1519 il suo territorio si estendeva da un oceano all'altro e dall'attuale Messico centro-settentrionale ai confini del Guatemala. Al di là della valle di Messico, fortemente urbanizzata, il potere imperiale si attenuava: nelle aree periferiche l'imperatore regnava grazie ad alleanze - spesso stabilite tramite matrimoni - e alla minaccia di ritorsioni contro eventuali ribelli.

La «triplice lega» era un impero basato sul tributo e riceveva regolarmente beni dalle regioni sottomesse. Non tutte le province erano contigue: certe zone del Messico centrale e meridionale erano indipendenti dal controllo azteco, o per la posizione difensiva troppo forte o per il basso valore economico che non ne giustificava la conquista.

Di solito i sovrani sconfitti conservavano la loro autorità locale, sia pure in qualità di vassalli dell'imperatore. Fra di essi vi erano i nobili che governavano le 11 province azteche corrispondenti ai più antichi regni acolhua (XIII secolo) e tepanec (XIV secolo). Questi nobili facevano risalire la propria ascendenza fino alla famiglia regnante dell'impero tolteco, che era crollato nel 1150 d.C. A ricordo di questa prestigiosa genealogia, i nobili delle 11 province inserivano il caratteristico motivo decorativo di derivazione tolteca - quadrati con punti nel centro - nei tessuti offerti in tributo.

in cotone - siano state adottate dai mexica dopo le vittorie dell'imperatore Axayacatl (che regnò dal 1470 al 1481 d.C.) nella regione huaxteca. Quest'area era particolarmente fertile e produttiva, famosa per l'eccellente cotone, l'abbondante produzione di derrate alimentari e i costumi licenziosi della popolazione. Questo verdeggiante mondo tropicale, che gli aztechi denominavano «terre calde», rivestiva un fascino particolare per i più sobri abitanti dell'arido altopiano centrale.

Un aspetto delle abitudini huaxteche che affascinava particolarmente gli aztechi era la propensione per le bevande alcoliche. Nel costume huaxteco vi è un emblema caratteristico, un ornamento nasale a forma di mezzaluna, che ricorda questo tratto: la mezzaluna era infatti un simbolo degli dei del *pulque*, la principale bevanda alcolica mesoamericana che veniva prodotta fermentando il succo di un'agave, *A. atrovirens*. Ancora oggi in Messico si beve il pulque, benché si sia perduta l'abitudine azteca di rafforzarlo con una radice dalle proprietà allucinogene.

Gli aztechi avevano un atteggiamento ambivalente nei confronti delle bevande alcoliche e dell'ebbrezza, riconoscendone gli aspetti gioiosi, ma circondandole di rigide proibizioni. Le loro leggi limitavano strettamente il consumo di pulque a contesti rituali, tranne che per i cittadini di oltre 70 anni che potevano bere liberamente; non si sa però quanti potessero ragionevolmente sperare di raggiungere un'età così avanzata. Dopo la conquista, gli aztechi affermarono che la loro longevità era stata di gran lunga superiore prima dell'arrivo degli spagnoli, ma la pratica della cremazione dei cadaveri ha lasciato ben poche testimonianze oggettive a sostegno di questa loro affermazione.

Le difficoltà nel limitare il consumo di alcolici da parte del resto della popolazione dovevano essere notevoli, a giudicare dalle severe misure repressive: i cronisti spagnoli affermano che l'infrazione era punita con la morte. Tuttavia l'associazione del coniglio - simbolo di fecondità ed ebbrezza - con il riverito pulque fa pensare a un'approvazione nei confronti della bevanda per i suoi effetti sulla procreazione. Il messaggio soggiacente al simbolismo azteco è invariabilmente il mantenimento della fecondità.

La presenza del culto degli dei del pulque sulla costa del Golfo del Messico incuriosisce particolarmente perché il tipo di agave da cui si ricava la bevanda non cresce a quote così basse; la premi-

Il vizio e la virtù sono debitamente puniti o premiati nelle raffigurazioni di vita azteca che iniziano con il bagno cerimoniale di un neonato (*nella pagina a fronte in alto*). Quando il bambino cresce, il padre lo punisce tenendolo sopra un fuoco di peperoncini; la semplice minaccia fa pentire la bambina, sulla destra. Sotto, il ragazzo ancora ribelle è legato a terra finché anch'egli si ravvede. Più tardi il padre gli dà consigli sui modi buoni e cattivi di vivere. Ubriachi, ladri e adulteri sono puniti con la lapidazione (*qui sopra*). Una coppia virtuosa, raggiunti i 70 anni, è premiata con la possibilità di bere illimitatamente.

nenza dei simboli associati al pulque che si osserva a Tochpan e Tochtepec implica dunque che in quest'area i derivati dell'agave e i motivi a essi legati siano stati introdotti in epoca più antica, pre-azteca. Mantelli provenienti dalla costa del Golfo del Messico decorati con boccali da pulque venivano indossati in cerimonie ufficiali dai mexica di Tenochtitlán, a testimonianza del fatto che l'impero azteco, ancora relativamente giovane, cercava approvazione adottando la tradizione iconografica di una cultura più antica.

Gli elenchi di tributi del Codice Mendoza mostrano un esempio ancora più eloquente di questo fenomeno. Una serie di pezze di tessuto contiene un disegno ripetuto di quadrati bianchi e blu, ciascuno con un punto nel centro. Questo motivo, ottenuto con una tecnica di tintura previa annodatura che oggi prende il nome di *plangi*, doveva avere grandissima importanza in quanto contrassegnava il mantello ufficiale dei sovrani aztechi. La chiave per comprenderne il significato sta nella distribuzione geografica delle 11 province azteche che potevano includere questo motivo nei tessuti offerti in tributo: non solo i loro territori erano contigui, ma nel loro complesso esse corrispondevano a buona parte di due regni pre-aztechi fondati dopo la caduta del venerabile impero tolteco, la cui fine, nel 1150 d.C., aveva privato i nobili del patrimonio, ma non del prestigio.

I nuovi arrivati acolhua e tepanec - che, come più tardi i mexica, erano giunti nella zona come popolazioni nomadi - cercarono perciò di legittimare le proprie conquiste stringendo legami matrimoniali con la casa regnante della piccola città-stato di Colhuacan, la cui aristocrazia poteva vantare una pura ascendenza tolteca. Ottennero così il diritto di trasmettere il disegno esclusivo della famiglia reale tolteca alla discendenza sia maschile sia femminile. I mantelli ufficiali dei sovrani aztechi erano indicatori dinastici, insegne araldiche che proclamavano la legittima aspirazione degli aztechi alla prestigiosa ed essenziale eredità tolteca.

Le promozioni militari venivano conseguite per ciascun prigioniero catturato in battaglia. Il guerriero vestito di rosso raffigurato in basso a destra è salito di grado fino a divenire un generale ricolmo di onori.

La parte etnografica del Codice è la sola delle tre a non avere corrispettivi di epoca pre-spagnola: raffigura la tipica esistenza degli aztechi a partire dall'imposizione rituale del nome al neonato, scena accompagnata da simboli che indicano la possibile occupazione futura. Per i ragazzi, la prima immagine è quella di uno scudo con frecce; tutti gli aztechi di sesso maschile ricevevano un addestramento militare prima di divenire agricoltori o di specializzarsi in un'arte o in una professione. Segue la rappresentazione di alcune specializzazioni artigianali; per una ragazza, tuttavia, i soli strumenti raffigurati sono una scopa, un fuso e un cesto da lavoro (*si veda l'illustrazione a pagina 66 in alto*).

I fogli successivi coprono le età da tre a quindici anni, ogni anno indicato da un pallino turchese. La giusta quantità di cibo per pasto è simboleggiata da una razione di tortilla: mezza all'età di tre anni, due a 13 anni. Queste limitazioni per il cibo, come quelle che si applicavano alle bevande alcoliche, riflettono un'enfasi quasi spartana sulla moderazione, sulla disciplina e sulle altre virtù marziali. E, come nel caso delle pratiche educative usate dagli spartani, l'importanza data

Un sacrificio umano è raffigurato nel Codice Magliabechiano, compilato nella valle di Messico in data anteriore al 1566. Un cuore ancora palpitante appare sulla sinistra; il cadavere di una vittima già sacrificata è stato fatto rotolare giù dalla scalinata del tempio.

alle punizioni aumentava via via che i bambini crescevano.

Ogni genitore era tenuto a inculcare ai figli il codice azteco di obbedienza, moderazione, modestia e diligenza. Un cattivo comportamento all'età di otto o dieci anni veniva punito solo da percosse sulle mani con una bacchetta o da punture con una spina di agave, ma le punizioni diventavano sempre più severe via via che il bambino cresceva. Nell'illustrazione, un ragazzo di 11 anni ancora disobbediente viene costretto a inalare il fumo irritante di un fuoco di peperoncini; una ragazza minacciata dello stesso crudele castigo comprende, a quanto pare, i propri errori. Nelle vignette successive la si vede pulire con diligenza il pavimento, macinare il granoturco e tessere. Il ragazzo, invece, rimane indisciplinato fino a 12 anni e viene quindi legato e costretto a dormire sul terreno umido. A 13 anni, però, anch'egli aiuta nei lavori di casa, trasportando canne e pescando con impegno nel Lago Texcoco.

I fogli sull'educazione infantile sono seguiti da illustrazioni sui due tipi di addestramento riservati ai ragazzi. I giovani dell'aristocrazia seguivano un curriculum intellettuale, sacerdotale e militare, mentre l'istruzione dei ragazzi di ceto più modesto si concentrava su abilità pratiche oltre che sull'addestramento alla guerra. Le donne, che si sposavano verso i 15 anni di età, appaiono raramente nei fogli successivi.

Lo scopo primario dell'educazione maschile era quello di produrre guerrieri valenti, e le splendide tenute militari erano viste come un incentivo. Se l'obbiettivo strategico della guerra si riduceva alla distruzione del tempio principale del nemico, anche il fine tattico era limitato: di solito si cercava di non uccidere gli avversari, ma di catturarli in modo che potessero in seguito essere offerti agli dei. Questi sacrifici prendevano sempre la forma di cerimonie accuratamente ritualizzate.

Quando un soldato sopraffaceva il proprio avversario, recitava la formula «Egli è come il mio amato figlio» e il prigioniero, a sua volta, rispondeva: «Egli è come il mio amato padre», accettando così il proprio destino come eletto degli dei. In seguito, su una pietra posta alla sommità di una piramide a gradini, i sacerdoti estraevano il cuore della vittima per offrirlo alle divinità.

Si riteneva che, in punto di morte, la vittima sacrificale assumesse una natura divina: era questo un onore immenso, sia per gli aztechi sia per i loro nemici, che era accompagnato dalla certezza di una sorte gloriosa nell'aldilà.

Si deve notare che il sacrificio dei prigionieri costituiva solo una parte dei doni rituali destinati agli dei. La maggior parte delle offerte di sangue era rappresentata da sacrifici individuali imposti periodicamente a ogni uomo, donna e bambino azteco. Il sangue veniva estratto da varie parti del corpo e offerto alle divinità nei rispettivi giorni festivi. I sacrifici più importanti erano quelli che servivano al sostentamento del dio solare, dal quale si riteneva dipendesse il destino del mondo.

Dato che veniva incontro a esigenze religiose, forniva ai guerrieri la possibilità di migliorare la propria posizione sociale e aumentava la potenza e la ricchezza dello Stato, la guerra assunse un carattere così formale che, a volte, gli Stati confinanti si accordavano sulla data di una battaglia.

Da questo modo di combattere estremamente ritualizzato possiamo trarre una importante conclusione: i conquistatori spagnoli avrebbero certamente avuto il sopravvento sulle popolazioni mesoamericane anche se non avessero potuto disporre dei vantaggi loro offerti dalla tecnologia europea - sicuramente più avanzata - come l'impiego della cavalleria contro i soldati appiedati, delle lame di acciaio contro quelle di ossidiana e delle micidiali armi da fuoco contro le lance e i propulsori.

Gli ultimi fogli della terza parte del Codice Mendoza descrivono quelli che per gli aztechi erano il giusto compenso per una vita virtuosa e la debita punizione per aver condotto un'esistenza indegna (*si veda l'illustrazione a pagina 67*). Una vivace sequenza d'immagini mostra un padre che illustra al figlio non solo i meriti che si acquistano dedicandosi con impegno a un lavoro, ma anche le conseguenze alle quali possono andare incontro gli oziosi: il vagabondo le cui membra penosamente deformate portano i segni del castigo di una dea vendicativa; il fanatico giocatore di palla, un giovane che scommette letteralmente la camicia al gioco del *patolli*; il ladro che sottrae il contenuto di una cassetta; il maldicente; la giovane coppia che beve smodatamente e ricorre al furto.

Alla fine i bevitori, un ladro e una coppia adultera giacciono morti, lapidati, mentre una virtuosa coppia di settantenni è circondata dalle sollecite cure dei nipoti. L'uomo canta allegramente odorando un mazzo di fiori che gli è stato offerto; la donna e la sua anziana amica sembrano dedicarsi completamente alle gioie del bere; sia la capace brocca traboccante di schiuma sia la coppa portata alla bocca sono contrassegnate dal simbolo a forma di mezzaluna degli dei del pulque.

Per quanto siano ricche e dettagliate queste informazioni, si desidererebbe una quantità ancora maggiore di particolari descrittivi. Per esempio, con l'eccezione delle tenute militari, sempre minuziosamente raffigurate, le vesti che appaiono in tutta la parte etnografica sono prive di disegni ornamentali o di vivaci motivi colorati, il che contrasta con i resoconti dei testimoni oculari e con parecchi dei tessuti rappresentati negli stessi elenchi dei tributi contenuti nel Codice Mendoza.

Ma per questa parte finale del Codice gli spagnoli avevano chiesto qualcosa

che probabilmente non aveva precedenti nella pittografia del Nuovo Mondo: la rappresentazione della cultura e dello stile di vita di un intero popolo. L'artista eseguì questo compito come meglio poteva, pur restando nel solco della propria tradizione culturale. La sua riuscita opera, eseguita solamente 20 anni dopo l'arrivo degli europei, rappresenta un affascinante adattamento dello stile di raffigurazione indigeno a una tematica che era tipica del Vecchio Mondo. Considerando quali altri sconvolgimenti gli aztechi avevano già dovuto subire dopo la conquista, questo fu senza dubbio uno dei cambiamenti meno sconvolgenti che gli spagnoli imposero ai loro nuovi sudditi.

Di tutti i traumi culturali prodotti dalla scoperta dell'America, nessuno fu più drammatico della conquista dell'impero azteco da parte di Cortés, una vera e propria «guerra dei mondi». Qui si confrontarono due culture di complessità sociale e livello artistico paragonabili, ognuna completamente sconosciuta all'altra. Il loro scontro catastrofico portò alla completa distruzione e sottomissione di una delle più peculiari e vulnerabili civiltà di tutta la storia umana.

Fortunatamente per noi, uno squarcio di quel mondo ormai destinato a scomparire è stato magnificamente immortalato nelle preziose rappresentazioni contenute nel Codice Mendoza.

BIBLIOGRAFIA

VAILLANT GEORGE C., *La civiltà azteca*, Einaudi, Torino, 1972.

SCARDUELLI PIETRO, *Gli Aztechi e il sacrificio umano*, Loescher, Milano, 1980.

BERDAN FRANCES F., *The Aztecs of Central Mexico: An Imperial Society*, Holt, Rinehart and Winston, 1982.

DE SAHAGÚN BERNARDINO, *Storia indiana della conquista del Messico*, Sellerio, Palermo, 1982.

AUTORI VARI, *Tenochtitlán. Gli aztechi e le loro radici*, Jaca Book, Milano, 1985.

SILVINI G. (a cura), *L'impero degli aztechi nella sua tradizione storica. Il codice Ramirez, manoscritto della prima metà del sec. XVI*, Edizioni Paoline, Milano, 1985.

RIEFF ANAWALT PATRICIA, *The Emperors' Cloak: Aztec Pomp, Toltec Circumstances* in «American Antiquity», 55, n. 2, aprile 1990.

RIEFF ANAWALT PATRICIA, *Indian Clothing before Cortés: Mesoamerican Costumes from the Codices*, University of Oklahoma Press, 1990.

BERDAN FRANCES F. e RIEFF ANAWALT PATRICIA, *Codex Mendoza*, University of California Press (in corso di stampa).

Elettronica «singolare»

Nuovi dispositivi basati sul moto di elettroni singoli aprono prospettive straordinarie sia per la misurazione di correnti e cariche elettriche infinitesimali sia per la miniaturizzazione dei circuiti integrati digitali

di Konstantin K. Likharev e Tord Claeson

Se si chiede qual è la minima carica elettrica che si può collocare sulla capocchia di uno spillo si ottiene una risposta sorprendente. Lo spillo, come qualsiasi altro oggetto, è fatto di elettroni, protoni e neutroni. Un protone possiede una carica unitaria fondamentale (indicata con $+e$) mentre un elettrone possiede una carica uguale ma negativa ($-e$); il neutrone invece è privo di carica. Sembrerebbe a tutta prima di poter calcolare la carica complessiva della capocchia di spillo contando il numero di protoni, sottraendo il numero di elettroni e ignorando i neutroni. Seguendo questo ragionamento, la minima carica non nulla dovrebbe essere $+e$ o $-e$, ma recenti esperimenti dimostrano che le cose non stanno così e indicano con chiarezza che la carica sulla capocchia può anche essere uguale a una frazione della carica di un elettrone, per esempio $+0{,}5e$ o $-0{,}1e$.

La misurazione della carica in strutture di piccole dimensioni ha ispirato affascinanti esperimenti di fisica e parecchie potenziali applicazioni nel campo dell'elettronica. Gli esperimenti sono stati eseguiti con dispositivi estremamente piccoli, di circa 30 miliardesimi di metro, più o meno il diametro di un virus. Studiando il comportamento di questi minuscoli componenti a temperature di una frazione di grado al di sopra dello zero assoluto, si è compreso meglio come si muovono le cariche elettriche in vari materiali. Mentre in un sottile strato di materiale isolante (o dielettrico) la carica fluisce in quantità discrete (come acqua che gocciola da un rubinetto), nei materiali conduttori ordinari essa si sposta in modo continuo (come acqua che scorre in un tubo).

Queste scoperte hanno portato all'invenzione di dispositivi di nuovo tipo, basati sul controllo del moto di singoli elettroni nei solidi. Questi dispositivi a elettroni singoli possono svolgere le funzioni dei transistori e di altri componenti elettronici; benché ancora ai suoi primi passi, riteniamo che questa tecnologia assumerà in futuro grande importanza.

Il settore dell'elettronica «singolare», cioè basata sul moto di elettroni singoli, ebbe origine dallo studio di un dispositivo chiamato «giunzione tunnel». Esso è costituito da due elettrodi di materiale conduttore separati da un sottile strato di materiale isolante, dello spessore anche di un solo nanometro. Nei conduttori gli elettroni si spostano liberamente, ma entrano a fatica nei dielettrici; tuttavia, in base ai principi della meccanica quantistica, essi hanno una piccola probabilità di attraversare lo strato isolante grazie all'effetto tunnel.

Se alla giunzione viene applicata una differenza di potenziale, gli elettroni tendono ad attraversare il dielettrico in un verso preferenziale, e quindi alimentano una certa corrente elettrica attraverso la giunzione. L'intensità di questa corrente dipende sia dallo spessore dello strato isolante sia dalle proprietà fisiche degli elettrodi.

Verso la metà degli anni ottanta i fisici erano ormai riusciti a comprendere molte delle proprietà delle giunzioni tunnel, tuttavia alcuni di essi supponevano che questi dispositivi avrebbero manifestato un comportamento interessante se avessero avuto dimensioni inferiori a circa 100 nanometri.

All'inizio del 1985, Dmitri Averin e uno degli autori (Likharev) tentarono di prevedere il comportamento di minuscole giunzioni tunnel dotate di elettrodi superconduttori. (La superconduttività è una proprietà che certi materiali manifestano quando sono raffreddati a temperature prossime allo zero assoluto; i superconduttori devono il nome al fatto che non oppongono resistenza al passaggio della corrente elettrica.) Averin e Likharev speravano di risolvere il problema applicando concetti di fisica quantistica. Ricavarono effettivamente equazioni che descrivevano il dispositivo, ma queste erano tanto complicate che non sarebbe stato possibile risolverle se non a costo di grandi sforzi.

Si decise quindi di affrontare il caso più semplice di una piccola giunzione tunnel con elettrodi fatti di conduttori ordinari. Le relative equazioni furono risolte senza fatica e fornirono un risultato affatto inatteso: una corrente elettrica costante, attraversando una giunzione, dovrebbe dar luogo a un'oscillazione periodica nel tempo della differenza di potenziale. Ma la cosa più interessante è che queste oscillazioni periodiche dovrebbero avere una frequenza pari alla corrente divisa per la carica dell'elettrone. La frequenza è dunque indipendente da qualsiasi altro parametro del sistema. Un'analisi più accurata delle equazioni dimostrò che ciascuna oscillazione rappresenta la risposta data dal dispositivo quando un singolo elettrone attraversa per effetto tunnel lo strato isolante. Oggi si parla quindi di oscillazioni per tunneling di elettroni singoli (SET, dall'inglese *single-electron tunneling*).

Per comprendere questo fenomeno è necessario sapere in che modo la carica elettrica fluisce in un conduttore, per esempio in un comune cavo di alluminio. Un conduttore consente il passaggio della corrente elettrica perché alcuni elettroni sono liberi di muoversi nel reticolo dei nuclei atomici. Nonostante il moto di questi elettroni, in un dato volume di conduttore la carica complessiva resta nulla perché in ogni porzione, anche piccola, di materiale la carica negativa degli elettroni in moto è sempre compensata dalla carica positiva dei nuclei atomici. Quindi non è importante la carica contenuta in un dato volume, bensì la quantità di carica trasportata lungo il cavo, la cosiddetta carica «trasferita». La cosa più sorprendente è che la carica trasferita può avere in pratica qualsiasi valore, anche una frazione della carica dell'elettrone.

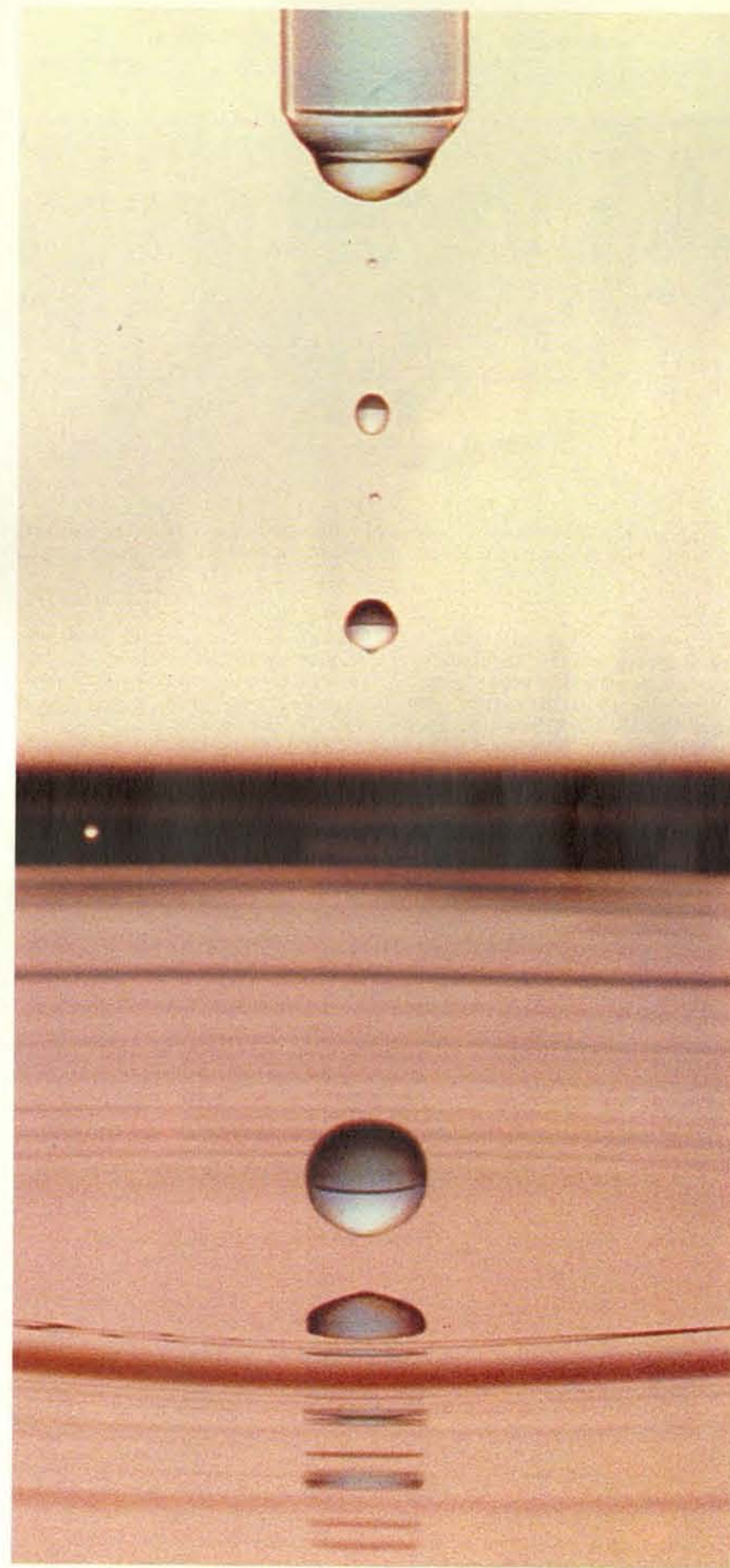
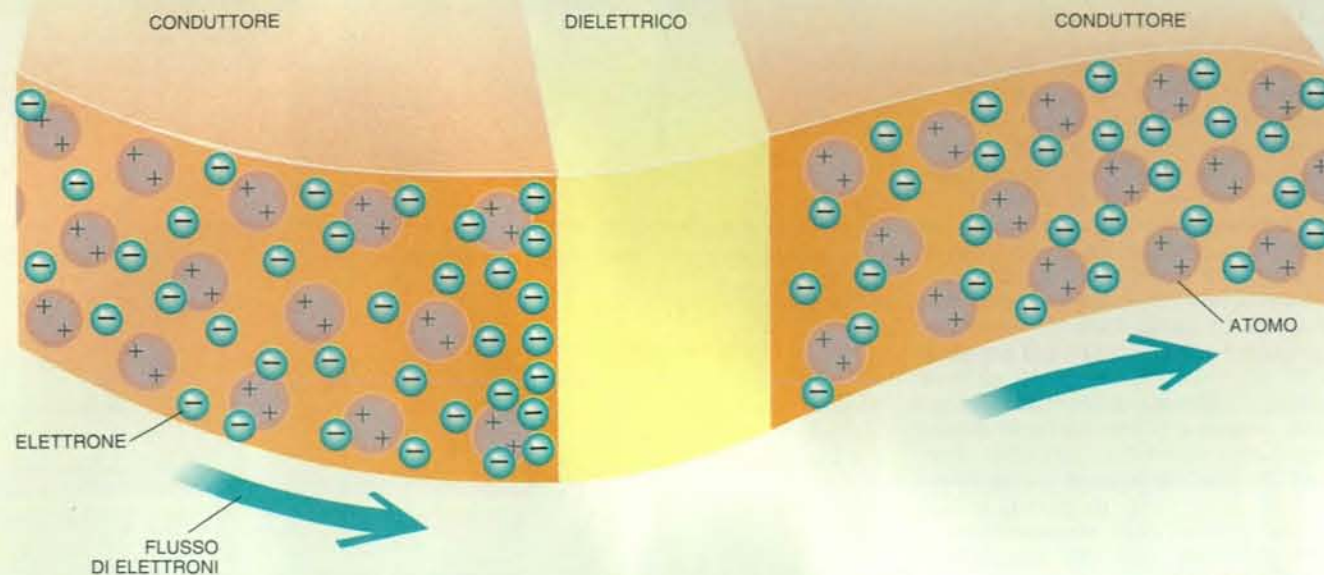
Questo concetto, a un primo impatto, appare contrario alla logica, ma può essere spiegato in termini semplici. In effetti la carica trasferita ha poco a che fare con il conteggio dei singoli elettroni e protoni: essa è proporzionale alla somma delle traslazioni di tutti gli elettroni rispetto al reticolo atomico. Poiché gli elettroni di un conduttore possono subire traslazioni di ampiezza arbitraria, questa somma, e quindi anche la carica trasferita, può variare con continuità.

Se un conduttore ordinario viene interrotto da una giunzione tunnel, la carica elettrica si sposta nel sistema grazie a un processo che è insieme continuo e discreto. La carica trasferita fluisce con continuità nel conduttore e si accumula sulla superficie di uno degli elettrodi perché è bloccata dallo strato isolante della giunzione (l'altro elettrodo assume una carica superficiale uguale e opposta). Si può immaginare questa carica superficiale Q come un piccolo spostamento continuo degli elettroni prossimi alla superficie dalla loro posizione di equilibrio. D'altro canto, secondo la meccanica quantistica, l'effetto tunnel può provocare solo variazioni discrete di Q: quando un elettrone attraversa il dielettrico, la carica superficiale varia di $+e$ o $-e$ a seconda del verso di attraversamento. Combinandosi tra loro, il flusso continuo di corrente nei conduttori e il trasferimento discreto di carica attraverso la giunzione tunnel producono diverse conseguenze interessanti.

Questi fenomeni possono essere osservati quando le giunzioni tunnel sono estremamente piccole e la temperatura ambiente è molto bassa. (La bassa temperatura riduce le fluttuazioni termiche che disturbano il moto degli elettroni.) In tal caso, se la carica Q alla giunzione è maggiore di $+e/2$, un elettrone può attraversare la giunzione in un certo verso, e Q diminuisce di e. L'elettrone manifesta questo comportamento perché in tal modo l'energia elettrostatica del sistema viene ridotta. (L'energia aumenta in modo proporzionale al quadrato della carica e quindi non dipende dal segno di quest'ultima.)

Analogamente, se Q è minore di $-e/2$, un elettrone può attraversare la giunzione nel verso opposto, facendo aumentare Q di una quantità e; anche in questo caso l'energia diminuisce. Tuttavia se Q è compresa tra $-e/2$ e $+e/2$, il passaggio di un elettrone in qualunque verso fa aumentare l'energia del sistema. Quindi, se la carica iniziale è compresa in questo intervallo, l'effetto tunnel non ha luogo; questo fenomeno prende il nome di blocco coulombiano (o elettrostatico).

È da notare che il blocco coulombiano

Una gocciolina d'acqua si forma all'estremità di una pipetta di vetro e poi cade: questo fenomeno è analogo al modo nel quale la carica elettrica fluisce nei dispositivi elettronici «singolari».

Una giunzione tunnel è formata da due elettrodi conduttori separati da un sottile strato di isolante (dielettrico). Quando al dispositivo si applica una differenza di potenziale, gli elettroni attraversano il dielettrico e generano una debole corrente.

fu osservato e studiato per la prima volta più di quarant'anni fa. Negli anni cinquanta e sessanta, Cornellis Gorter del Kammerling Onnes Laboratory, Hans-Rudi Zeller e Ivar Giaver del General Electric Research Center e John Lambe e Robert Jaklevich della Ford Motor Company osservarono questo effetto in pellicole metalliche sottili e ne fornirono la spiegazione. In seguito Igor Kulik e Robert Shekhter, dell'Istituto di fisica criogenica di Kharkov ne formularono una descrizione teorica esauriente per un sistema particolare. Sembra tuttavia che fino alla metà degli anni ottanta nessuno avesse fatto molto caso al concetto di trasferimento continuo di carica nei metalli e che nessuno fosse al corrente della semplice condizione che provoca il blocco coulombiano. Una volta afferrati questi concetti, però, la scoperta di nuovi fenomeni nelle giunzioni tunnel di piccole dimensioni fu immediata.

Per esempio, che cosa accade se la giunzione è collegata a un generatore di corrente costante? Se all'inizio la carica superficiale Q è nulla, il sistema si trova nell'intervallo del blocco coulombiano e l'effetto tunnel non si manifesta: pertanto la corrente che il generatore immette nei cavi comincia a modificare con continuità la carica Q. Si supponga per semplicità che il tasso di accumulo della carica sia positivo. Quando la carica raggiunge e supera di poco il valore $+e/2$, l'effetto tunnel diventa possibile: allora un elettrone attraversa la giunzione e la carica assume un valore leggermente superiore a $-e/2$. A questo punto il sistema è di nuovo nell'intervallo di blocco e l'effetto tunnel non è possibile. La corrente continua a incrementare la carica alla giunzione a tasso costante e Q cresce fino a superare di nuovo $+e/2$. La ripetizione del processo dà luogo alle oscillazioni SET: la differenza di potenziale varia periodicamente con frequenza pari alla corrente divisa per l'unità di carica fondamentale e.

Si può dunque dire che la carica attraversa la giunzione tunnel come acqua che cada da un rubinetto. All'inizio la carica si raccoglie alla giunzione così come nel rubinetto si forma una gocciolina; poi, quando la carica accumulata è sufficiente, parte di essa attraversa la giunzione, proprio come la goccia cade quando ha raggiunto una certa grandezza. Tuttavia, mentre le gocce d'acqua possono avere dimensioni diverse, la carica che attraversa la giunzione per effetto tunnel è quantizzata ed è sempre uguale a e.

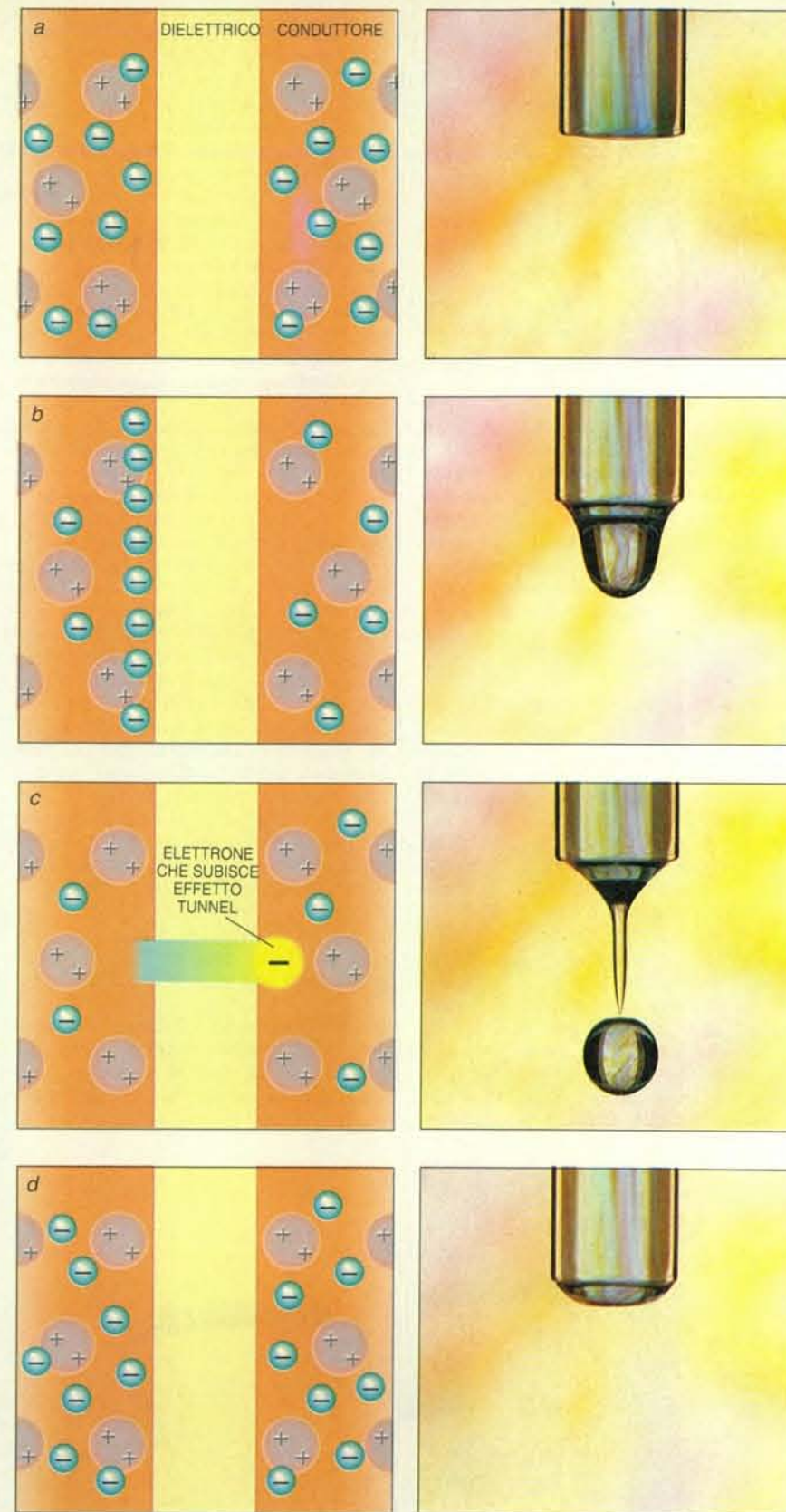
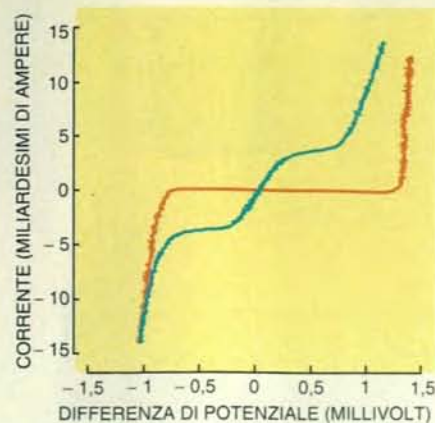
Facendo alcune ipotesi plausibili, la formula della frequenza delle oscillazioni SET può essere ricavata da principi di fisica classica perché descrive un comportamento di tipo corpuscolare degli elettroni. Tuttavia esiste un profondo legame tra le oscillazioni SET e un tipo di oscillazioni previste dalla meccanica quantistica. In molte circostanze l'elettrone si comporta come un'onda anziché come una particella; l'onda a esso associata ha una frequenza caratteristica, pari all'energia dell'elettrone divisa per la costante di Planck. Nel 1962 Brian Josephson (che allora era studente all'Università di Cambridge) dimostrò che nelle giunzioni tunnel di grandi dimensioni con elettrodi superconduttori questa relazione può essere osservata per via sperimentale e si manifesta come una relazione fondamentale tra la differenza di potenziale applicata e la frequenza delle oscillazioni della corrente che attraversa la giunzione. Verso la metà degli anni ottanta, James Lukens e collaboratori della State University of New York a Stony Brook si servirono di queste «giunzioni Josephson» per dimostrare che la relazione di Planck-Bohr-Josephson è precisa almeno fino alla sedicesima cifra decimale. Noi riteniamo che l'equazione classica delle oscillazioni SET si rivelerà altrettanto precisa.

Per generare le oscillazioni SET, è necessario costruire giunzioni tunnel di superficie estremamente piccola e raffreddarle fino a temperature molto basse, in modo che l'energia termica non perturbi l'effetto tunnel. Per esempio, se la giunzione ha una lunghezza e una larghezza di 100 nanometri, dev'essere raffreddata a una temperatura di circa un decimo di grado sopra lo zero assoluto.

Ma la refrigerazione e la miniaturizzazione non sono gli unici problemi sperimentali da superare. Per fornire corrente e differenza di potenziale a una giunzione tunnel, occorre collegare a essa cavi metallici. Purtroppo i cavi raccolgono le fluttuazioni quantistiche dei campi elettromagnetici presenti ovunque nell'ambiente, e queste fluttuazioni possono mascherare completamente gli effetti legati ai singoli elettroni. Uno dei metodi più semplici per evitare il mascheramento è quello di collegare in serie più giunzioni tunnel: disposte in questo modo, le giunzioni si proteggono a vicenda dalle fluttuazioni. Questa idea fu messa in pratica nel 1989 da un gruppo di scienziati svedesi e sovietici, tra i quali Per Delsing del Politecnico Chalmers in Svezia, Leonid Kuzmin dell'Università statale di Mosca e gli autori. Il gruppo costruì le giunzioni modificando la tecnica detta a maschera sospesa, usata per fabbricare dispositivi di dimensioni nanometriche. Parecchi ricercatori hanno contribuito all'invenzione di questa tecnica, poi perfezionata da Gerald Dolan degli AT&T Bell Laboratories.

Per cominciare si deve rivestire un substrato isolante con due strati di materiali organici speciali, entrambi di spessore inferiore a un micrometro. Per lo strato inferiore utilizzammo un copolimero di polimetilmetacrilato (PMMA) e acido polimetacrilico (PMAA), mentre lo strato superiore era di PMMA puro. Poi il substrato così rivestito viene introdotto nella camera a vuoto di un microscopio elettronico a scansione. Benché sia impiegato soprattutto per ottenere immagini, questo strumento è utile anche per la fabbricazione di dispositivi elettronici perché genera un fascio di elettroni del diametro di pochi nanometri, la cui energia è sufficiente a spezzare i legami dei polimeri. Il fascio, guidato da un calcolatore, traccia sul rivestimento polimerico la figura voluta. Nei nostri esperimenti questa figura era una successione di finestre rettangolari, poste molto vicine l'una all'altra, di 200 per 80 nanometri. Poi il campione viene sviluppato immergendolo in toluene, che rimuove il PMMA dalle regioni esposte e il sottostante copolimero da un'area un po' più ampia. Questo procedimento lascia uno strato di PMMA forato da finestre che è sospeso sopra il substrato.

A questo punto il campione viene collocato in un'altra camera a vuoto dove è esposto a un fascio di atomi di alluminio. Il fascio deposita una sottile pellicola di alluminio sullo strato di PMMA e sulle porzioni del substrato sottostanti alle finestre. (Queste «isole» di alluminio sono destinate a diventare il primo strato conduttore della schiera di giunzioni tunnel.) Poi si introduce nella camera una piccola quantità di ossigeno secco, che forma sulla superficie un sottilissimo strato di ossido di alluminio. (L'ossido di alluminio diventerà lo strato isolante della giunzione.) Dopo di che l'ossigeno viene espulso e un altro strato di alluminio viene depositato da un angolo diverso. Così le isole del primo e del secondo strato si sovrappongono formando una schiera di giunzioni tunnel, ciascuna di circa 80 per 60 nanometri.

Quando il nostro gruppo cominciò a fabbricare queste schiere di giunzioni, ci domandammo anche quale fosse il metodo migliore per misurare le oscillazioni SET, la cui energia prevista era bassissima. Una misurazione diretta avrebbe richiesto rivelatori ad alta frequenza di estrema sensibilità. Un metodo più semplice per rivelare le oscillazioni è quello di irradiare il campione con microonde. La radiazione interagisce (o «si mescola») con le oscillazioni SET in un modo che consente di rivelarle facilmente: in particolare, quando la corrente che attraversa la giunzione cresce partendo da zero, la differenza di potenziale dovrebbe aumentare finché la corrente raggiunge il valore di e volte la frequenza della radiazione. A questo punto la dif-

Il processo di tunneling di elettroni singoli attraverso una giunzione di dimensioni ridotte è simile alla caduta di una goccia d'acqua da una pipetta di vetro. Dapprima l'interfaccia tra elettrodo e isolante è priva di carica (*a*). Via via che gli elettroni si spostano nell'elettrodo, alla superficie del conduttore si accumula carica (*b*). Quando la carica accumulata è sufficiente, un elettrone attraversa lo strato isolante e la carica superficiale diminuisce (*c*). Se la carica è reintegrata il processo si ripete (*d*).

La corrente elettrica che attraversa una schiera di 25 giunzioni tunnel è quasi nulla (*curva in arancione*) tra − 0,8 e + 1,2 millivolt a causa del blocco coulombiano. Esponendo la schiera alle microonde si elimina il blocco e la corrente aumenta con un andamento a gradini (*curva in blu*). L'altezza dei gradini è pari alla carica di un elettrone moltiplicata per la frequenza delle microonde.

ferenza di potenziale continua ad aumentare, mentre la corrente resta costante per un po' e poi ricomincia a crescere. Pertanto, nel grafico della corrente in funzione della differenza di potenziale si dovrebbero osservare gradini orizzontali in corrispondenza di un valore della corrente uguale alla frequenza moltiplicata per + *e* (o − *e*). Nel luglio 1989 riuscimmo a osservare questi gradini.

I nostri risultati furono ben presto confermati da un gruppo franco-olandese con base al Politecnico di Delft e al Centro per le ricerche nucleari di Saclay. Questi ricercatori usavano due tipi diversi di schiere di giunzioni, in cui il campo a microonde non viene applicato alle estremità della schiera bensì agli elettrodi centrali. Grazie a questi dispositivi, il rapporto tra corrente e frequenza fu misurato con una precisione vicina allo 0,1 per cento. Inoltre, nel 1990, Bart Geerligs e Hans Mooij del gruppo di Delft confermarono una teoria proposta da Averin e da Arcadij Odintsov che indicava una strada per migliorare la precisione. Crediamo che nel prossimo futuro il rapporto tra corrente e frequenza sarà misurato con un errore non più grande di una parte per milione e probabilmente molto inferiore.

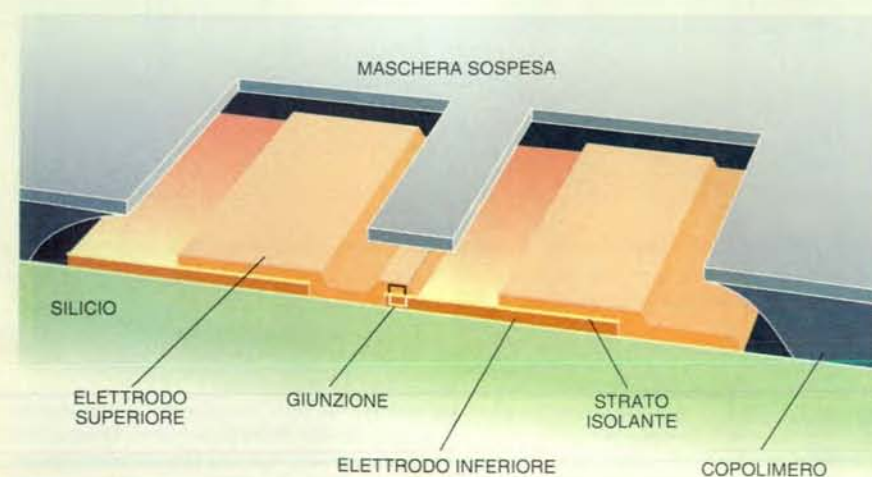
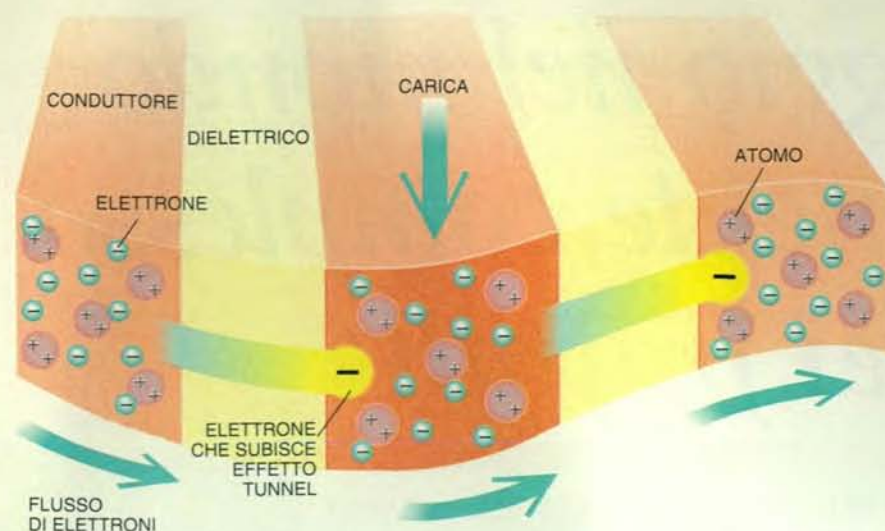
Fenomeni simili alle oscillazioni provocate da elettroni singoli dovrebbero presentarsi anche nelle giunzioni tunnel con elettrodi superconduttori. I primi ad abbozzare una teoria di questi fenomeni nelle giunzioni tunnel a superconduttori furono, nel 1982, Allen Widom, Terry Clark e collaboratori dell'Università di Brighton. Poi, nel 1984, Aleksandr Zorin dell'Università statale di Mosca e uno degli autori (Likharev) formularono una teoria più raffinata e realistica.

Nei superconduttori ciascun elettrone ha un compagno con cui forma una «coppia di Cooper». Quindi, se gli elettrodi di una giunzione tunnel sono superconduttori, gli elettroni tendono ad attraversare a coppie il dielettrico per effetto tunnel. Secondo la teoria, la differenza di potenziale di una giunzione tunnel a superconduttori di dimensioni molto piccole dovrebbe allora oscillare con una frequenza pari alla corrente divisa per 2*e* (e non per *e*). Likharev e Zorin diedero a questo fenomeno il nome di oscillazioni di Bloch. Nel febbraio 1991 Kuzmin, David Haviland e colleghi al Politecnico Chalmers individuarono con certezza oscillazioni di Bloch in una piccola giunzione formata da due sottili pellicole di una lega superconduttrice.

Le oscillazioni SET e le oscillazioni di Bloch possono essere considerate come la successione (la «correlazione») temporale di eventi di tunneling subiti da elettroni singoli o da coppie di Cooper. Si può osservare anche un altro tipo di correlazione di questi eventi, che potrebbe essere importante per future applicazioni. Una correlazione di questo tipo si presenta per esempio in un dispositivo costituito da due giunzioni tunnel aventi in comune un elettrodo centrale. Se al dispositivo si applica una differenza di potenziale costante, gli eventi di tunneling nelle due giunzioni devono essere tra loro correlati. In particolare, ogni volta che un elettrone attraversa una giunzione, quasi simultaneamente un secondo elettrone attraversa l'altra giunzione.

La cosa più importante, come dimostrarono Averin e Likharev nel 1985, è che questi eventi correlati possono essere controllati introducendo (o asportando) con continuità carica elettrica nell'elettrodo che collega le due giunzioni. Se la carica introdotta in questo elettrodo è vicina a zero o a un multiplo di *e*, nel dispositivo si mantiene un considerevole blocco coulombiano: quando la differenza di potenziale applicata al sistema è inferiore a una certa soglia, attraverso la giunzione non c'è passaggio di corrente. Ma se la carica dell'elettrodo centrale è + 0,5*e* o − 0,5*e* (o anche + 1,5*e*, + 2,5*e* e così via), il blocco coulombiano viene del tutto eliminato: gli elettroni attraversano il sistema per effetto tunnel e basta una debole differenza di potenziale per indurre passaggio di corrente. Quindi, come in un transistore ordinario a semiconduttore, la corrente che attraversa il dispositivo può essere controllata variando la carica dell'elettrodo centrale, ma il controllo può essere esercitato con segnali di carica molto più deboli. Per questo motivo il dispositivo con due giunzioni tunnel viene oggi chiamato transistore a elettroni singoli.

Per buona sorte, l'effetto di tunneling correlato non è sensibile alle fluttuazioni quantistiche del campo elettromagnetico ambiente, sicché il dispositivo può essere facilmente collegato a un generatore di tensione e a strumenti di misurazione. Fu grazie a questo fatto che Kuzmin e Likharev riuscirono a effettuare esperimenti sul transistore a elettroni singoli entro un tempo brevissimo dall'ideazione del dispositivo. Il 6 marzo 1987 essi comunicarono i loro risultati a una rivista specializzata sovietica. (Appresero in seguito che lo stesso giorno Theodore Fulton e Gerald Dolan dei Bell Laboratories avevano inviato a una rivista statunitense un articolo concernente osservazioni molto simili.) Questi due lavori segnarono l'inizio dell'elettronica «singolare» sperimentale.

Negli ultimi cinque anni si sono ideati molti tipi di transistori a elettroni singoli e si sono costruiti anche circuiti elettronici singolari più complessi. Il comportamento di tutti questi circuiti può essere spiegato compiutamente nei termini di quella che oggi prende il nome di teoria ortodossa, che venne formulata nel 1985 dal gruppo di Mosca. Questa teoria può

Per fabbricare minuscole giunzioni tunnel si usa la tecnica della maschera sospesa.

Il transistore a elettroni singoli è un dispositivo che può consentire o bloccare il flusso di miliardi di elettroni al secondo quando la carica dell'elettrodo centrale subisce una variazione non più grande di metà della carica di un elettrone.

essere usata per analizzare le possibili applicazioni dell'elettronica singolare.

Nel prossimo futuro prevediamo almeno tre applicazioni importanti. In primo luogo questa tecnologia dovrebbe fornirci un nuovo standard per la misurazione di correnti deboli. Prevediamo che sia possibile raggiungere una precisione di almeno una parte su un miliardo, circa mille volte superiore a quella dei sistemi esistenti. Inoltre potremo costruire elettrometri ultrasensibili, in grado di misurare cariche pari a un decimillesimo di e: una risoluzione quasi un milione di volte superiore a quella degli strumenti in commercio. (Elettrometri del genere sono già stati usati da ricercatori di Saclay e dei Bell Laboratories per misurare eventi di tunneling di elettroni singoli in altri dispositivi.)

Ma la prospettiva di maggiore interesse aperta dall'elettronica singolare riguarda le applicazioni ai circuiti integrati digitali. Oggi i chip per calcolatori possono contenere circa 10 milioni di componenti per centimetro quadrato. Benché si tratti di una densità impressionante, i progettisti di calcolatori continuano a richiedere chip con densità sempre più elevate. I dispositivi elettronici tradizionali si stanno però avvicinando ai loro limiti: è opinione generale che per ottenere ulteriori riduzioni nelle dimensioni ci vorranno idee radicalmente nuove, e sotto questo profilo l'elettronica singolare è molto promettente.

Nei circuiti basati sull'elettronica singolare i bit d'informazione possono essere rappresentati dalla presenza o dall'assenza di elettroni singoli. Questa tecnologia può consentire di stipare su un chip di un centimetro quadrato anche 10 miliardi di componenti elettronici (per questo scopo le dimensioni delle giunzioni tunnel dovrebbero essere ridotte a circa 10 nanometri). Un circuito del genere dovrebbe funzionare a quattro kelvin, una temperatura accettabile per certe applicazioni; tuttavia la costruzione di questi circuiti richiederà ancora molto tempo e un notevole impegno.

In linea di principio sarebbe possibile aumentare ancora la densità dei circuiti a elettroni singoli, ma per far questo si dovrebbero superare due ostacoli. Per prima cosa occorrerebbe introdurre tecniche per la fabbricazione di strutture complesse aventi dimensioni inferiori a 10 nanometri. Inoltre si dovrebbe stabilire come si modifichino gli effetti legati agli elettroni singoli quando le dimensioni del dispositivo diminuiscono fino alla scala atomica.

Nel tentativo di risolvere il secondo problema, Averin e Aleksandr Korotkov dell'Università statale di Mosca modificarono nel 1989 la teoria ortodossa, riconoscendo che, se il dispositivo è abbastanza piccolo, i principi della meccanica quantistica assumono maggiore importanza. In tal caso infatti l'energia degli elettroni è quantizzata, cioè può assumere solo certi valori discreti. I due studiosi dimostrarono però che la quantizzazione dell'energia non esclude l'effetto tunnel correlato, anzi i due fenomeni possono coesistere pacificamente.

Per verificare questa conclusione parecchi gruppi di ricercatori hanno effettuato esperimenti in cui gli elettroni sono confinati entro minuscole strutture di materiale semiconduttore. Tali strutture, dette punti quantici e pozzi quantici, possono contenere un «agglomerato» di alcune centinaia di elettroni liberi. Tutti e due i dispositivi consentono agli elettroni di entrare e uscire attraversando per effetto tunnel barriere di energia ben definite. In entrambi i tipi di esperimento si sono osservati sia effetti dovuti a elettroni singoli sia la quantizzazione dell'energia, il che dimostra che questi fenomeni possono coesistere. Paul McEuen e colleghi del Massachusetts Institute of Technology e del Thomas J. Watson Research Center della IBM sono stati i primi a dimostrare questa coesistenza nei punti quantici; Bo Su e collaboratori di Stony Brook e dei Bell Laboratories hanno ottenuto risultati analoghi con i pozzi quantici.

Restano però da risolvere alcuni problemi fondamentali. Per prima cosa, non è stato ancora affrontato il problema di come la quantizzazione dell'energia influisca sugli effetti di carica dovuti agli elettroni singoli in circuiti composti da molti punti o pozzi quantici. Uno studio preliminare dimostra che in queste strutture un elettrone può comportarsi simultaneamente come onda e come particella. Se questa previsione dovesse rivelarsi esatta, le conseguenze per la fisica teorica sarebbero importantissime.

Un altro problema non risolto è se il trasferimento correlato degli elettroni richieda necessariamente un processo di tunneling. Averin e Likharev hanno di recente sostenuto che non sia così; flussi correlati potrebbero essere prodotti in canali molto stretti nei quali gli elettroni si possano propagare in una sola direzione. Alcuni esperimenti in preparazione dovrebbero chiarire se sia possibile fabbricare questi canali.

A prescindere da questi nuovi problemi, l'elettronica singolare ci ha già fatto capire meglio il comportamento degli elettroni nei diversi materiali. Riteniamo anche che essa abbia dato un contributo a quella che si potrebbe chiamare la psicologia della fisica. La scoperta del processo di tunneling correlato ci ha fornito un esempio di fenomeno fondamentale e concettualmente semplice che era passato inosservato fino alla metà degli anni ottanta, dimostrando che l'«oceano di verità ignote» di cui parlava Newton è ancora vasto e attende scienziati muniti solo di un po' d'inventiva e d'immaginazione. E i sostenitori delle raffinatezze teoriche più esasperate e degli esperimenti da molti miliardi di dollari dovrebbero tenere tutto ciò ben presente.

BIBLIOGRAFIA

LIKHAREV K. K., *Correlated Discrete Transfer of Single Electrons in Ultrasmall Tunnel Junctions* in «IBM Journal of Research and Development», 32, pp. 144-158, gennaio 1988.

LIKHAREV K. K., *Single Electronics* in *Granular Nanoelectronics*, NATO ASI Series B, Physics vol. 251, a cura di David K. Ferry e altri, Plenum Press, 1991.

GRABERT HERMANN e DEVORET MICHEL H. (a cura), *Single Charge Tunneling*, Plenum Press (in stampa).

Il controllo della rabbia nell'ambiente naturale

L'impiego di esche trattate con vaccini attivi per via orale ha consentito di arrestare la diffusione di questa malattia in diverse specie selvatiche; si spera ora di estendere il metodo ai cani dei paesi in via di sviluppo

di William G. Winkler e Konrad Bögel

Il 13 aprile 1990, in una taverna della città di Mercedes, nel Texas, un pipistrello morse l'indice destro di un giovane di 22 anni che, sottovalutando l'episodio, non consultò un medico. Tutto sembrò normale fino al 30 di maggio, quando la mano interessata cominciò ad accusare sintomi di debolezza; nel giro di soli sei giorni il ragazzo decedeva a causa della rabbia, dopo aver manifestato molti dei sintomi caratteristici di questa malattia. Prima di entrare in coma, il ragazzo aveva sofferto di episodi di rigidità e di mancanza di respiro, di allucinazioni, di estrema difficoltà di deglutizione (al punto da rifiutare i liquidi), di spasmi del viso, della bocca e del collo con continua emissione di bava e infine di disorientamento accompagnato da febbre alta.

Questa orribile morte colpisce ogni anno circa 25 000 persone in tutto il mondo. Un tragico bilancio che potrebbe presto essere contenuto grazie agli sviluppi, realizzati negli ultimi 30 anni, di nuovi metodi per vaccinare diverse specie di animali nel loro ambiente naturale. Semplice il principio: si tratta di disporre opportunamente esche commestibili impregnate con vaccini, attivi per via orale, prodotti con i metodi dell'ingegneria genetica.

La necessità di concentrare gli sforzi sugli animali deriva dal fatto che gli odierni metodi di intervento sull'uomo presentano diversi inconvenienti. Il virus della rabbia, che può causare malattia in tutti i mammiferi, si diffonde tramite il morso di un animale infetto. È letale se non si interviene prima della comparsa dei sintomi, ma può essere combattuto con una somministrazione ripetuta di vaccino immediatamente successiva al morso. Il vaccino, che oggi può essere iniettato nel braccio e non nell'addome come avveniva in passato, deriva da un virus della rabbia ucciso. Esso stimola il sistema immunitario a distruggere il virus attivo, soprattutto se in associazione con il vaccino vengono iniettate gammaglobuline antirabbia nella zona circostante la ferita (si veda l'articolo *La rabbia* di Martin M. Kaplan e Hilary Koprowsky in «Le Scienze» n. 139, marzo 1980).

Sfortunatamente ogni anno migliaia di persone, probabilmente sane, si sottopongono a queste cure perché non sanno se l'animale che le ha morse sia o meno infetto. Ciò è evidentemente indesiderabile, sia perché la terapia è costosa, sia perché qualunque tipo di vaccinazione comporta il rischio di effetti collaterali. (È questa considerazione a scoraggiare la profilassi mediante vaccinazione, oltre al fatto che, nell'uomo, essa non assicura una completa protezione.)

Molte persone, inoltre, muoiono per la rabbia semplicemente perché vivono in paesi poveri. Spesso coloro che vengono attaccati dall'animale infetto o vivono in luoghi carenti di strutture sanitarie adeguate o non possono permettersi di sostenere il costo delle cure.

La vaccinazione sistematica delle specie animali che possono trasmettere il virus sembra quindi essere il modo più efficace per salvare vite umane e, al tempo stesso, risparmiare sofferenze agli animali. In parte questa azione preventiva è già una realtà. Nei paesi con tenore di vita più alto, il trattamento periodico dei cani domestici con vaccino antirabbico ha bloccato la trasmissione della malattia dal cane all'uomo. E lo stesso può essere fatto con i gatti.

Tuttavia, nei paesi in via di sviluppo, le cure veterinarie sono difficili (e costose) da praticare e questo fa sì che i cani siano responsabili del 90 per cento delle morti umane per rabbia. Un altro problema consiste nel fatto che, anche dove gli animali domestici sono controllati, quelli liberi, che certo non si lasciano docilmente condurre dal veterinario, comportano una minaccia costante.

Ed è proprio per questi gruppi non controllabili che la distribuzione sul territorio di esche contenenti il vaccino sembra una strategia molto promettente. Questo metodo sta infatti già bloccando la diffusione della rabbia nelle volpi selvatiche di molte regioni dell'Europa occidentale e del Canada. E alcuni studi preliminari hanno mostrato che la rabbia può essere controllata anche in altre specie animali.

Negli Stati Uniti si sta ora sperimentando un tipo di esca con vaccino per i procioni. Se si registrassero i risultati sperati, il metodo potrebbe finalmente rallentare la diffusione di una epidemia di rabbia tra i procioni che a partire dagli anni cinquanta si è propagata dalla Florida a tutta la costa orientale degli Stati Uniti. Inoltre, se il metodo venisse perfezionato e sviluppato per le popolazioni canine dei paesi in via di sviluppo, si potrebbe finalmente ridurre drasticamente in tutto il mondo il numero di decessi umani dovuti alla rabbia.

Questa incoraggiante prospettiva è in netto contrasto con la situazione degli anni sessanta, quando la ricerca sulla vaccinazione degli animali allo stato selvatico era ai primordi. In quegli anni, negli Stati Uniti, la vaccinazione sistematica aveva già ridotto l'incidenza della rabbia nei cani, ma rimaneva ancora preoccupante l'infezione diffusa tra volpi, moffette, procioni e pipistrelli. Rispetto ai cani, questi animali sono più raramente a diretto contatto con l'uomo, ma essendo nel loro complesso più numerosi, rappresentano un rischio notevole. Negli anni cinquanta, al fine di controllare la diffusione della rabbia tra gli animali selvatici, si decise di assottigliare le popolazioni animali ospiti del virus. Tra i vari metodi impiegati vi fu l'introduzione di gas nelle tane, l'avvelenamento con esche, l'uccisione con armi da fuoco e l'uso di trappole mortali.

Si riteneva che l'abbattimento di un sufficiente numero di animali potesse ridurre la popolazione di una specie al punto che gli individui infetti sarebbero morti senza contagiare gli altri. Questa strategia fermò il diffondersi della malattia nei gruppi presi di mira, ma solo per un breve periodo.

Riesaminando i vari esperimenti condotti in seno ai programmi di riduzione della popolazione di volpi, moffette e procioni, si concluse che, per ottenere risultati migliori, si sarebbe dovuto eliminare un numero enorme di capi. E, siccome queste specie sono molto prolifiche, si sarebbe dovuto intervenire su più del 60 per cento della popolazione per eradicare la rabbia per un periodo più lungo di un ciclo riproduttivo (generalmente un anno). Questo obiettivo sarebbe stato estremamente difficile e costoso da raggiungere: uno studio del 1960 sui costi del controllo della rabbia tra le volpi, preventivò un costo di oltre 26 dollari per ogni animale abbattuto.

Vennero anche sollevati problemi per la crudeltà del provvedimento. I programmi basati sulla massiccia distruzione di popolazioni animali divennero impopolari con il crescere della sensibilità del pubblico per le questioni ambientali. Di conseguenza lo stanziamento di fondi (rimasti peraltro sempre assai limitati)

Questo procione affetto da rabbia fu catturato in Virginia nel 1983, quando già da alcuni anni la malattia, a partire dalla Florida, si era diffusa tra i procioni lungo tutta la costa orientale degli Stati Uniti. Si cerca tuttora di bloccare l'epidemia con la disseminazione di esche contenenti vaccino; una nuova preparazione è attualmente in sperimentazione sul campo.

Epidemie di rabbia si sono manifestate negli Stati Uniti (*aree in colore*) non solo tra i procioni, ma anche tra le volpi e le moffette. L'87 per cento dei casi di rabbia negli animali è attribuibile a queste specie, insieme con i pipistrelli (il dato riguarda sempre gli USA). Nei pipistrelli la rabbia non si diffonde rapidamente e quindi non viene considerata epidemica. L'epidemia di rabbia dei procioni è «esplosa» nella regione medio-atlantica (lasciando la lacuna visibile nella mappa, che corrisponde al North Carolina) nel 1977, forse in seguito alla liberazione in Virginia, da parte di cacciatori, di 3500 procioni provenienti dalla Florida.

per finanziare progetti di questo tipo, divenne quasi impossibile.

Una delle prime soluzioni alternative tentate negli Stati Uniti consisteva nel catturare gli animali selvatici per iniettare loro gli stessi vaccini impiegati negli animali domestici. Il trattamento, sperimentato su basi limitate, funzionò magnificamente sugli esemplari trattati, ma la maggior parte degli animali riusciva a evadere dalle trappole. In ogni caso esso era troppo costoso per meritare ulteriore attenzione.

Poi, verso la fine del 1961, George M. Baer dei Centers for Disease Control (CDC) di Atlanta, cominciò a mettere a punto sistemi per fare in modo che gli animali si autovaccinassero nel loro ambiente. Oggi egli può essere a buon diritto considerato il padre del concetto di autovaccinazione, anche se inizialmente la sua idea sollevò molte perplessità.

Parte dello scetticismo derivava dal fatto che a quel tempo i più efficaci prodotti per animali reperibili in commercio erano ottenuti da ceppi di virus della rabbia vivi, seppure attenuati. Si sapeva che alcune specie, particolarmente i roditori, possono venire contagiate dal virus della rabbia tramite vaccini attenuati e si temeva che, dopo la distribuzione, i virus attenuati avrebbero riguadagnato la capacità di moltiplicarsi incontrollatamente all'interno dell'ospite, riacquistando la loro virulenza.

Ma a questo si pensò solo in un secondo momento: il primo problema era quello di inventare un metodo di vaccinazione pratico ed efficace. Baer, nei suoi primi tentativi, aveva riadattato un dispositivo originariamente concepito per avvelenare i coyote che attaccavano le greggi di pecore. Chiamato *Coyote Getter* (Acchiappa coyote), l'apparecchio consisteva in una sorta di pistola conficcata nel terreno in modo da lasciarne scoperta solo l'estremità e il grilletto. L'estremità era coperta di lana odorosa che aveva lo scopo di attirare le vittime. Quando un coyote tentava di mordere la lana, il grilletto scattava e il congegno sparava nelle fauci dell'animale un getto di cianuro.

Baer intendeva indurre l'immunità sostituendo vaccino al veleno. Sperava che le particelle virali attraversassero la mucosa orale provocando così la risposta immunitaria. Ma, sfortunatamente, il vaccino per via orale non immunizzava in modo adeguato. Spesso, invece, la violenza del getto danneggiava la bocca dell'animale, rendendogli impossibile nutrirsi per un certo periodo di tempo, e compromettendone quindi la capacità di sopravvivenza. (I pipistrelli, che si nutrono di insetti in volo, non furono obiettivo di questo o di altri metodi di autovaccinazione.)

Si tornò così daccapo e si cominciarono a sviluppare altri sistemi di vaccinazione, che però si dimostrarono inadeguati per essere impiegati al di fuori del laboratorio. Alla fine, tuttavia, si giunse all'invenzione di un dispositivo più pratico, denominato *Vac-Trap*.

Il dispositivo derivava dalle comuni tagliole che imprigionano la zampa di un animale quando essa viene appoggiata su una pedana nascosta che fa scattare il meccanismo. In questo caso, però, la pressione faceva scattare la molla di un braccio metallico che conficcava una siringa sulla coscia dell'animale per iniettare il vaccino nel muscolo.

Verso la metà degli anni sessanta, uno di noi (Winkler), veterinario presso il CDC, sperimentò le Vac-Trap per due mesi sull'isola di San Clemente, al largo della costa californiana. Il sistema immunizzò il 25 per cento delle volpi e il 16 per cento dei gatti randagi dell'isola o, per meglio dire, fece sì che questi animali producessero quantità elevate di anticorpi contro la rabbia. Inoltre non furono segnalati decessi o chiari danni agli animali e all'ambiente.

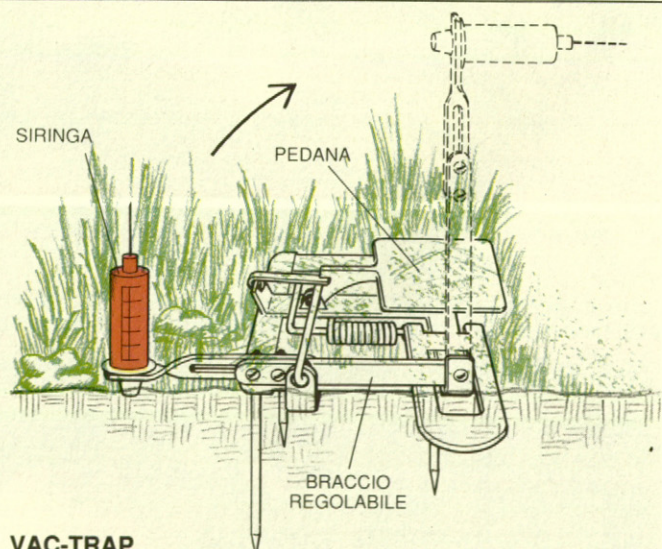
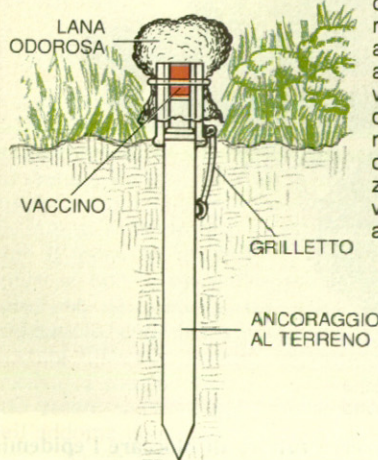
Al tempo stesso, però, le Vac-Trap non potevano vaccinare in modo economico il 60-70 per cento di una popolazione animale, cioè la percentuale necessaria per eliminare la rabbia in una data area. Inoltre, l'animale doveva entrare nella trappola da una direzione precisa, altrimenti la siringa avrebbe mancato il bersaglio. Ma particolarmente inaccettabile era la pericolosità del meccanismo: anche un uomo poteva inavvertitamente appoggiare il piede sulla pedana e subire un'istantanea iniezione di vaccino procurata da un grosso ago. La possibile esposizione di esseri umani al virus attenuato destava certo qualche preoccupazione, ma ciò che decretò la scomparsa della Vac-Trap fu il pericolo di questi aghi vaganti dispersi un po' dovunque.

Il problema della sicurezza si pose per esempio una notte, non appena Winkler ed il suo gruppo ebbero terminato di disporre 130 trappole lungo la spiaggia. Qualcuno li informò che l'isola di San Clemente, zona militare e sede di esercitazioni della US Navy, sarebbe stata «attaccata» quella stessa notte da un reparto d'assalto di marines. Gli ignari soldati, strisciando ventre a terra, avrebbero potuto essere seriamente feriti dagli aghi delle Vac-Trap.

Gli ufficiali comandanti dell'isola, messi al corrente del problema, suggerirono di lasciare le trappole al loro posto,

Evoluzione dei metodi di vaccinazione

COYOTE GETTER

Negli Stati Uniti, agli inizi degli anni sessanta, furono fatti alcuni esperimenti per somministrare vaccino antirabbico utilizzando una trappola progettata in origine per uccidere i coyote predatori. Quando gli animali accostavano la bocca alla lana che nascondeva il congegno, un getto di vaccino veniva «sparato» nella loro cavità orale. Spesso la violenza del getto danneggiava la bocca, impedendo all'animale di nutrirsi.

VAC-TRAP

Il dispositivo, che per chiarezza mostriamo fuori dal terreno, viene in realtà nascosto tutto sotto terra tranne il braccio, che affiora in superficie. Quando un animale calpesta la pedana che fa scattare il meccanismo, il braccio si impenna iniettando così sul fianco dell'animale il vaccino contenuto nella siringa. Questo meccanismo, progettato da un gruppo di ricercatori statunitensi, fu sottoposto a sperimentazione sul campo alla fine degli anni sessanta, ma venne presto abbandonato data la sua pericolosità.

SALSICCE

Negli Stati Uniti, nel corso degli anni settanta, le volpi in cattività venivano vaccinate con questa esca. Masticando la salsiccia, gli animali provocavano piccoli fori nella cannuccia dalla quale usciva il vaccino. I finanziamenti a sostegno di questo progetto di vaccinazione furono sospesi prima di effettuare sperimentazioni in natura.

TESTE DI POLLO

Negli anni settanta i ricercatori svizzeri dimostrarono che le teste di pollo possono costituire esche molto apprezzate dalle volpi. Il vaccino veniva posto in un sacchetto introdotto sotto la pelle. Negli anni ottanta questo sistema cadde in disuso a causa dell'introduzione di esche molto più facili da produrre in grossi quantitativi.

ESCHE INDUSTRIALI

Dopo il 1985, in Europa e in Canada si cominciarono a impiegare esche di diversa composizione prodotte industrialmente con appositi macchinari. Il tipo mostrato nell'illustrazione è stato distribuito sul territorio canadese lanciandolo da aeroplani. Il rivestimento di cera ricopre il contenitore del vaccino; esso viene insaporito con pollo, per aumentarne l'appetibilità, e contiene tetraciclina, un marcatore che permette di riconoscere facilmente gli animali vaccinati.

aumentando così la possibilità di verificare l'accortezza dei soldati nel corso dell'esercitazione. La mattina seguente, dopo una notte in bianco, il gruppo di Winkler osservò che, mentre alcune volpi erano cadute nelle trappole, fortunatamente nessun militare era stato colpito. Tuttavia questa situazione di potenziale pericolo bastò a convincere anche il più ottimista dei ricercatori che era necessario trovare un metodo più sicuro.

Unica soluzione ragionevole era quella di evitare l'uso di strani dispositivi e incorporare il vaccino nella stessa esca alimentare che avrebbe attirato gli animali. Ebbe così inizio il Progetto di vaccinazione antirabbica orale, sempre condotto dal CDC. Nonostante il fallimento del Coyote Getter, sussistevano sufficienti ragioni per ritenere che la vaccinazione orale potesse funzionare. Si era osservato, per esempio, che alcuni topi si erano immunizzati contro la rabbia nutrendosi delle carcasse di animali idrofobi.

Tuttavia, ottenere una efficace immunizzazione degli animali selvatici non sarebbe stato facile. Il primo problema era il vaccino stesso: i prodotti esistenti in commercio erano inefficaci se ingeriti, sia perché non attraversavano l'epitelio di rivestimento della bocca e della faringe sia perché l'acidità dell'ambiente gastrico tendeva a degradarli. Bisognava dunque superare queste difficoltà prima di avviare seriamente la nuova metodologia di vaccinazione.

Baer e John G. Debbie, un veterinario virologo del New York State Department of Health, fecero un primo tentativo immettendo il virus della rabbia attenuato in una capsula cronoide, simile a quelle impiegate per ritardare l'azione dei farmaci. John G. Black e il suo collaboratore Kenneth F. Lawson dei Connaught Laboratories di Toronto, ebbero indipendentemente la stessa idea.

Con l'impiego della capsula, i ricercatori intendevano proteggere il vaccino durante il passaggio attraverso lo stomaco in maniera da farlo agire direttamente nell'intestino. Ma entrambi i gruppi di ricerca dovettero constatare con rammarico che quella soluzione non garantiva una adeguata produzione di anticorpi.

Era chiaro che, per garantire un futuro alla vaccinazione orale, il vaccino doveva essere assorbito dalle mucose che rivestono la cavità orale, prima di raggiungere lo stomaco. Ma il vaccino antirabbico attraversa le membrane con difficoltà e quindi è necessaria la presenza di molte particelle virali per assicurare l'assorbimento di un numero sufficiente di antigeni. Dal momento che i vaccini esistenti erano troppo diluiti per soddisfare queste condizioni, il primo obiettivo da realizzare era quello di renderli più attivi.

Alla fine degli anni sessanta, Baer, in collaborazione con virologi di organizzazioni pubbliche e private, raggiunse questo obiettivo facendo riprodurre il virus in una coltura di cellule prelevate dai reni di criceti neonati. Queste cellule permettono la produzione di maggiori quantità di virus della rabbia rispetto ad altri sistemi di coltura. Baer e i suoi colleghi migliorarono anche la stabilità del vaccino, prevedendo che esso potesse rimanere esposto all'aria anche per alcuni giorni prima di essere ingerito dall'animale. Per Baer e Winkler il momento era maturo per concentrare l'attenzione sull'esca. Un'esca ideale doveva incorporare il vaccino senza reagire con esso e senza diminuirne l'efficacia; doveva inoltre essere facile da maneggiare e da disporre nell'ambiente, e risultare appetibile solo per gli animali cui era destinata e non per gli altri. Come il vaccino, anche l'esca doveva essere stabile e resistere a un rapido deterioramento dovuto alla pioggia o al calore.

Si presero in considerazione diverse combinazioni di esca e vaccino; per esempio vennero impregnati di vaccino biscotti per cani di varie forme e misure, rivestendoli poi con cera o sego dal profumo allettante.

Agli animali di laboratorio furono date solo le esche che si erano dimostrate più resistenti alle massime escursioni di temperatura e umidità. Si iniziò con volpi, procioni e manguste (queste ultime erano vittime di epidemie di rabbia nelle isole del Mare delle Antille). Poi, dopo circa 14-30 giorni, furono effettuati prelievi di sangue per verificare la presenza e i livelli di anticorpi contro la rabbia. Nel corso di quella specifica ricerca non furono notati cambiamenti nei procioni e nelle manguste, ma ci fu una risposta migliore nelle volpi, in quanto questi animali sono più sensibili al virus della rabbia. E proprio per questa ragione la ricerca si concentrò sulle volpi. La visita di Winkler a un ristorante McDonald's gli ispirò l'idea alla base del primo vero successo con le volpi. Baer aveva suggerito che una sottile salsiccia affumicata molto apprezzata dalla clientela potesse fungere ottimamente da esca. Guardando le cannucce di plastica del McDonald's, Winkler cominciò a immaginare di immettere il vaccino in una capsula a forma di cannuccia, sigillata alle estremità, posta all'interno della salsiccia.

In vaste regioni d'Europa sono state sparse esche contenenti vaccino antirabbico allo scopo di eradicare la malattia tra le volpi. Le aree in verde sono quelle interessate dalla campagna condotta tra il 1978 e il 1990, mentre le aree in marrone riguardano la campagna del 1991. La prima operazione di distribuzione su larga scala avvenne nella vallata del fiume Rodano in Svizzera, nel 1978 (*in dettaglio*); in quella zona, le esche costituite da teste di pollo contenenti il vaccino bloccarono la diffusione della rabbia al di fuori del cordone sanitario predisposto dagli esperti.

Quando, nel 1972, Winkler e Baer cibarono le volpi di laboratorio con salsicce «al vaccino», tutti gli animali le masticarono voracemente, rompendo con i denti la cannuccia e ingerendo carne mista a vaccino. Nessuna delle volpi si ammalò e tutte resistettero alla successiva inoculazione di una dose letale di virus della rabbia. (Nello stesso periodo anche in Germania ebbe successo un programma di vaccinazione orale delle volpi.)

Nel 1974 Winkler condusse alcune prove usando semplici esche prive di vaccino. Dispose le esche nell'isoletta di Amak, in Alaska, abitata unicamente da volpi rosse e da alcune specie di piccoli roditori. Ovviamente, le volpi mangiarono con avidità le esche loro generosamente offerte. Si pensava che gli animali avrebbero potuto immagazzinare le esche per consumarle in tempi successivi, ma questo non fu osservato.

Questo successo sembrava giustificare l'idea di inserire il vaccino nelle esche, ma non se ne fece nulla: proprio in concomitanza con l'esperimento condotto in Alaska, infatti, l'incidenza della rabbia tra le volpi era diminuita, negli Stati Uniti, grazie a cause naturali. Per questo motivo l'autorità sanitaria decise di sospendere il progetto di vaccinazione antirabbica orale.

Proprio nel momento in cui il problema della rabbia nelle volpi iniziava a destare minore preoccupazione negli Stati Uniti, si ripropose in tutta la sua gravità in Europa, assumendo l'andamento di un'epidemia e causando un giustificato allarme. Perciò, nei primi anni settanta, uno di noi (Bögel), della Veterinary Public Health Unit dell'Organizzazione mondiale della sanità, riunì gli scienziati americani ed europei (inclusi Baer e Winkler) per discutere le possibilità di vaccinazione orale delle volpi in Europa. A differenza degli Stati Uniti, dove molte sono le specie di mammiferi portatrici del virus della rabbia, in Europa la sola vera minaccia è costituita dalle volpi.

Grazie a questi incontri, gli scienziati europei, sostenuti moralmente e in parte anche finanziariamente dall'OMS, proseguirono la ricerca sul Progetto di vaccinazione antirabbica orale, ormai accantonato dal governo statunitense. Quindici gruppi di ricerca dislocati in nove paesi collaborarono per molti anni allo studio della composizione di esche e vaccini, della sicurezza dei sistemi adottati e della fisiologia e del comportamento delle volpi. Il CDC fornì agli europei il virus con il quale produrre vaccini leggermente modificati rispetto a quelli americani. I gruppi, inoltre, optarono per nuove esche più semplici da produrre.

Il virus della rabbia ha un nucleocapside elicoidale, dove risiede il genoma a RNA, circondato da un rivestimento lipidico sul quale si inseriscono molecole glicoproteiche. Sono queste a provocare la risposta immunitaria nell'animale ospite. Il gene che specifica la glicoproteina è stato recentemente inserito nel virus del vaiolo vaccino per ottenere un prodotto che conferisce immunità, senza provocare malattia. La consulenza per l'illustrazione è di William H. Wunner del Wistar Institute.

Due ricercatori svizzeri, il veterinario Franz Steck e il biologo Alexander I. Wandeler, allora all'Università di Berna, furono i primi e i più entusiasti partecipanti europei al progetto. Cominciarono subito a confrontare diversi tipi di esca, scegliendo infine come più adatta la testa di pollo (reperibile a basso costo) sotto la cui pelle veniva inserita una piccola tasca riempita di vaccino.

Per valutare l'appetibilità dell'esca e la sicurezza del vaccino, i diversi gruppi di ricerca stabilirono aree di osservazione in cui esaminare il numero e il tipo di animali che si nutrivano dell'esca. Alcuni studi condotti con teste di pollo trattate con un marcatore a base di tetraciclina (che permette di individuare prontamente l'animale che si è nutrito dell'esca) mostrarono che le volpi ne erano ghiotte. Gli animali al di fuori degli scopi della ricerca ne mangiavano invece relativamente poche.

Circa nello stesso periodo, laboratori svizzeri, tedeschi e francesi, indipendentemente, concentrarono i loro studi sulla verifica dell'eventualità che le versioni attenuate del virus della rabbia potessero causare la malattia in roditori e in altre specie animali non coinvolte nella ricerca. Se questi animali, infatti, avessero subito il contagio trasmettendo così l'infezione ad altri animali, l'immissione del vaccino nell'ambiente sarebbe diventata alquanto pericolosa.

Anche quando il vaccino veniva somministrato per massimizzare le probabilità di infezione, erano pochi gli animali che si ammalavano. E in quelli che venivano colpiti dalla malattia, la quantità di virus nei tessuti era così bassa da rendere improbabile la trasmissione ad altri animali. Infatti, studi condotti su vasta scala per identificare trasmissioni secondarie diedero risultati negativi. Il vaccino non aumentò la virulenza dell'infezione. Questi e altri studi stabilirono con certezza che la somministrazione di virus attenuati era sicura e non comportava il minimo rischio di contagio tra specie diverse dalla volpe.

Nonostante i molti dati positivi che si stavano accumulando, molti scienziati tedeschi, tra i quali Gunther Wachendorfer dell'Istituto veterinario statale di Francoforte, continuavano a dichiarare il loro scetticismo. Ma anche quando lo stesso Wachendorfer tentò più volte di contagiare alcuni roditori con il virus attenuato, i suoi risultati si allinearono con quelli degli altri ricercatori che lo avevano preceduto.

La disponibilità di dati e l'incredibile potere di persuasione di Steck finirono con il convincere il governo svizzero ad approvare un esperimento sul campo. Quindi, verso la metà degli anni settanta, e per la prima volta in Europa, Steck e Wandeler liberarono nell'ambiente naturale il virus vivo della rabbia. Collocarono alcune esche contenenti il virus attenuato su un'isola del fiume Aare, dove non veniva registrata la presenza di animali infetti, per monitorarne l'effetto sui roditori locali. Nessun esemplare manifestò la rabbia.

Inoltre le indagini sul comportamento, sugli spostamenti, sulle abitudini alimentari, sulla crescita della popolazione e sui requisiti per l'immunizzazione delle volpi europee, fornirono informazioni di importanza fondamentale per pianificare le campagne di vaccinazione e per determinare il numero di esche da situare in una certa area e il periodo più adatto per l'operazione rispetto al ciclo vitale delle volpi.

Verso la fine degli anni settanta, le autorità sanitarie e i ricercatori europei ebbero alcune buone occasioni per sperimentare su vasta scala la vaccinazione orale con virus vivi. La loro grande op-

portunità giunse nel 1978, quando si verificò un'epidemia di rabbia tra le volpi lungo la costa orientale del Lago di Ginevra, epidemia che minacciava di diffondersi verso sud lungo la Valle del Rodano. La malattia sembrava destinata a penetrare profondamente nella valle per poi dirigersi verso est risalendo il corso del fiume.

Nel mese di ottobre dello stesso anno, Steck e Wandeler crearono un cordone sanitario per bloccare la diffusione dell'epidemia prima che si espandesse verso est. Di solito gli interventi messi in atto per bloccare la diffusione di gravi malattie negli animali richiedono la soppressione degli individui a rischio lungo il fronte di avanzamento dell'epidemia. In questo caso, invece, la barriera venne creata immunizzando le volpi. Vennero così distribuite teste di pollo contenenti il vaccino su una vasta area che tagliava la valle del Rodano (perpendicolarmente al corso del fiume) e si inerpicava sui versanti degli alti rilievi di quella regione, in modo da garantire che nessun esemplare potesse sfuggire al cordone sanitario predisposto.

Il gruppo di ricerca svizzero collocò manualmente 4050 esche contenenti il vaccino, coprendo così una superficie di 335 chilometri quadrati, fino alla curva a gomito che il fiume compie nel Canton Vallese. Dopodiché si attesero i risultati dell'operazione. La rabbia continuò a diffondersi verso la valle del Rodano, come previsto, ma si fermò in corrispondenza delle barriere, con grande gioia degli operatori.

Il successo di questo tentativo fu poi replicato in altre vallate svizzere. E naturalmente, dopo ogni successo, l'interesse del governo svizzero cresceva, creando così le premesse per finanziare altri programmi simili a questo in diverse zone del paese. (Purtroppo Steck perì tragicamente nel 1982 schiantandosi sul fianco di una montagna con l'elicottero da cui lanciava personalmente sul terreno le esche munite di vaccino.)

Nel 1983, la Repubblica Federale Tedesca, che aveva fortemente appoggiato la ricerca sui vaccini con virus vivi, ma che non aveva mai preso in considerazione l'idea di immetterli nell'ambiente naturale, diventò il secondo convinto partecipante agli esperimenti nell'ambiente naturale. I tedeschi avevano cambiato parere dopo che furono messe a punto tecniche in grado di stabilire se un animale infetto avesse contratto la malattia dal virus immesso nell'ambiente dall'uomo o attraverso il morso di un altro animale; il fatto che si potesse prontamente verificare se un virus attenuato riacquistava virulenza era per loro fonte di rassicurazione.

Fu infatti un veterinario tedesco - Lothar G. Schneider, del Centro per il controllo e la ricerca sulla rabbia che opera a Tübingen in cooperazione con l'OMS - a sviluppare sofisticate apparecchiature per la produzione di esche contenenti vaccino antirabbico. Grazie al suo metodo, Schneider è ora in grado di produrre

Questo poster invita i messicani a vaccinare i cani domestici. I cani non vaccinati sono responsabili della maggior parte dei casi di rabbia tra gli esseri umani, specialmente nei paesi in via di sviluppo. La distribuzione di esche contenenti vaccino antirabbico potrà in futuro portare a un controllo globale della malattia tra i cani. Alan M. Beck, della Purdue University, fotografò questo poster nel 1975.

più di due milioni di esche di forma cubica all'anno, contro le 150 000 teste di pollo confezionate dagli svizzeri. I cubi preparati con il suo metodo sono composti di una pappa di pesce, o altri preparati alimentari, ricoperti da una cera, o da grasso protettivo, dentro la quale viene collocato il contenitore del vaccino. Spesso nelle esche viene anche messa tetraciclina, per poter verificare se un dato animale si sia o meno cibato dell'esca.

Nel 1989, le volpi d'Europa venivano immunizzate con cinque diversi tipi di vaccino ottenuti da virus vivi. Erano tutti molto simili a quello originariamente studiato negli Stati Uniti, che però non era mai stato sperimentato sul campo. Dodici nazioni controllavano la rabbia nelle volpi con metodi di vaccinazione orale e coordinavano la loro campagna tramite il Centro di Tübingen. Inoltre, un gruppo di ricerca canadese stava valutando la validità di una massiccia distribuzione aerea di esche su vaste aree del territorio.

Oggi in Svizzera la rabbia è praticamente debellata, se si eccettuano le occasionali incursioni di animali infetti lungo i confini, e così pure sta rapidamente declinando in tutte le nazioni che hanno adottato i metodi di vaccinazione orale. Nei prossimi anni, inoltre, probabilmente non verranno più registrati casi di rabbia nelle volpi europee. Per la prima volta nella storia una malattia tipica degli animali allo stato selvatico è stata eradicata senza dover decimare per questo una popolazione animale.

Nonostante la ricerca condotta sulle volpi avesse dimostrato la realizzabilità pratica di programmi di vaccinazione per via orale contro la rabbia (e presumibilmente contro altre malattie) degli animali selvatici nel loro ambiente naturale, rimaneva la necessità di trovare vaccini alternativi in grado di controllare la rabbia nei procioni, nelle moffette e nei cani randagi o selvatici. Sono tuttora validi i primi risultati che davano come efficace nelle volpi solo l'immunizzazione orale condotta con vaccini preparati con virus non attenuati.

In laboratorio è stato però preparato un nuovo vaccino che si è dimostrato molto sicuro ed efficace su diverse specie animali. Viene prodotto con metodi di ingegneria genetica e dovrebbe essere più sicuro dei precedenti, dal momento che include solo una parte del virus della rabbia e non il virione intero. Pertanto, non potrebbe in ogni caso causare la malattia.

Questo vaccino è stato realizzato nel 1984 da alcuni ricercatori del Wistar Institute di Filadelfia (USA) e della Transgène S.A. (Francia), che hanno inserito un singolo gene del virus della rabbia in una versione attenuata del virus del vaiolo vaccino, che è già di per sé un agente patogeno piuttosto innocuo. Il gene prescelto contiene le istruzioni per sintetizzare una glicoproteina (una molecola che contiene sia proteina sia zucchero) che è generalmente presente nel rivestimento del virus della rabbia. Quando il virus del vaiolo vaccino si moltiplica nelle cellule che lo ospitano, queste ultime producono la glicoproteina che, a sua volta, provoca la produzione di anticorpi contro il virus della rabbia. Questo virus ricombinante viene ora usato in maniera molto estesa in diversi paesi, tra i quali il Belgio e la Francia, per immunizzare le volpi e, nel suo impiego nell'ambiente naturale, sembra avere la stessa efficacia della versione di vaccino derivata dal virus attenuato.

Anche negli Stati Uniti si stanno conducendo esperimenti nell'ambiente naturale mirati sui procioni. Charles E. Rupprecht e i suoi colleghi del Wistar Institute, hanno collocato su un'isola al largo della Virginia esche, contenenti vaccino antirabbico, con un sapore gradito ai procioni. Gli esperti hanno osservato che i procioni vaccinati sviluppano gli anticorpi contro la rabbia, mentre le specie non interessate dalla ricerca, che sono state osservate per un intero anno, non li producono. Analoghe esperienze sono in corso di attuazione sulla terraferma, in Pennsylvania.

Insieme alla sperimentazione viene portata avanti anche la ricerca per trovare i vaccini, le esche e le combinazioni esca-vaccino più adatte per le diverse specie animali. Per esempio, sostituti del virus del vaiolo vaccino possono dimostrarsi utili per produrre vaccini adatti a moffette e cani. Nei prossimi anni, la vaccinazione orale potrebbe bloccare l'epidemia di rabbia nei procioni americani e venire estesa anche ad altre specie, sempre che i finanziamenti, comunque molto ridotti, possano essere mantenuti.

Potrebbero anche essere istituiti programmi per la vaccinazione orale contro altre malattie che colpiscono gli animali selvatici. Una ricerca condotta in Germania ha infatti dimostrato che è possibile inserire in un'esca alimentare un vaccino in grado di proteggere le volpi dalla tenia.

Ma, dal punto di vista della salute umana, la prospettiva più entusiasmante è la possibilità di avere presto a disposizione un vaccino antirabbico che possa essere somministrato per via orale e a basso costo ai cani randagi o selvatici. Se questi animali che vivono nei paesi sottosviluppati venissero immunizzati, il numero delle persone che nel mondo muoiono in maniera orribile a causa della rabbia potrebbe finalmente essere enormemente ridotto.

BIBLIOGRAFIA

KUWERT E., MÉRIEUX C., KOPROWSKI H. e BÖGEL K. (a cura), *Rabies in the Tropics*, Springer-Verlag, 1985.

CAMPBELL J. B. e CHARLTON K. M. (a cura), *Rabies*, Kluwer Academic Publishers, 1988.

BAER GEORGE M. e altri (a cura), *Research toward Rabies Prevention.* A Symposium held in Washington, D.C., 3-5 November, 1986 in «Reviews of Infectious Diseases», 10, supplemento 4, novembre-dicembre 1988.

THRAENHART O., KOPROWSKI H., BÖGEL K. e SUREAU P. (a cura), *Progress in Rabies Control*, Wells Medical Limited, 1989.

BAER GEORGE M. (a cura), *The Natural History of Rabies*, CRC Press, 1991.

BÖGEL K., MESLIN F.X. e KAPLAN M., *Wildlife Rabies Control*, Wells Medical Limited, 1992.

L'ANGOLO MATEMATICO

di Ian Stewart

L'enigma del cammello fantasma

Con l'aiuto di Allah, il patriarca beduino Mustafa ibn Mokhta aveva difeso con successo la sua piccola tribù contro un feroce rivale, r ora, ferito gravemente in battaglia, giaceva a terra privo di sensi. Il barbiere Ali, suo amico d'infanzia, gli bendò le ferite e lo trasportò per chilometri e chilometri attraverso il deserto dell'Arabia settentrionale fino all'accampamento.

Mustafa si svegliò circondato da mogli, figli, figlie e nipoti. «Allah sia lodato: sono ancora vivo. Ma ora devo tornare a combattere.» Riuscì a mala pena a sollevare la testa.

«Riposati, ti prego, grande Mokhta» lo implorò la sua prima moglie, offrendogli dell'acqua da un otre di pelle. «Hai già guidato la tribù alla vittoria. Come ti senti?»

«Come se mi avesse calpestato un migliaio di cammelli» si lamentò Mustafa. «Chi mi ha salvato?»

«Il barbiere Ali» gli rispose la prima moglie.

«Conducilo subito da me.» Il figlio primogenito partì alla ricerca di Ali e la famiglia si disperse, lasciando Mustafa a riposare in pace nella sua tenda.

Come al solito, Ali era intento a radere tutti e soli i beduini che non si radevano da sé e a chiedersi chi avrebbe raso lui. Quando seppe che Mustafa aveva ripreso conoscenza, si affrettò a far visita al suo amico.

Ali entrò nella tenda di Mustafa. «Salaam aleikum. Mi sembra che tu stia meglio.»

«Aleikum salaam. Grazie a te e ad Allah, mi è stato concesso di rivedere la mia famiglia. Il mio corpo, però, è fiaccato senza rimedio, e temo che morirò presto.» Interruppe con un gesto le proteste dell'amico. «È inutile fingere. Voglio parlare con te del modo in cui dividere le mie ricchezze tra i miei tre figli. Li amo molto, ma sono un po' tardi d'ingegno: credo che dovrebbero dar prova della loro intelligenza prima di ereditare qualcosa.»

Ali aveva l'aria perplessa. «Non capisco, Mustafa.»

«Tra i miei beni c'è un antico trattato di aritmetica che pare sia stato scritto dal grande Al-Khowarizmi in persona. Vi si parla di un ricco mercante che possedeva 17 cammelli, il quale stabilì che alla sua morte il figlio maggiore avrebbe avuto metà del branco, il secondo figlio un terzo e il terzo figlio un nono.»

«Questo enigma mi ricorda qualcosa. Ovviamente, non ha senso offrire al primogenito otto cammelli e mezzo.»

«E nemmeno darne uno e otto noni al figlio minore. Ma c'è una soluzione ingegnosa al problema.»

«Sì, ora ricordo. Un vecchio saggio porta un suo cammello, così che il totale diventa 18. Il figlio maggiore ne prende metà, cioè nove cammelli; il secondo ne prende un terzo, cioè sei cammelli; e il più giovane ne prende un nono, cioè due cammelli. Il totale dei cammelli distribuiti è 17; il vecchio saggio si riprende il suo cammello, e tutti sono soddisfatti.»

«O almeno pensano di esserlo. In questo rompicapo l'aspetto psicologico è affascinante quanto quello matematico.»

«Ma, Mustafa, tu hai ben più di 17 cammelli.»

«In effetti, grazie alla benevolenza di Allah ne ho 39. Per di più, ho promesso a mio padre, sul suo letto di morte, di non vendere mai un cammello; quindi non posso ridurre il numero a 17. Naturalmente, non mi sarebbe difficile comprare qualche altro cammello se dovesse rivelarsi necessario. Il problema che non sono in grado di risolvere è se sia possibile ottenere un risultato analogo con un altro insieme di numeri.»

«Potresti moltiplicare tutto per tre» disse Ali. «Parti con 51 cammelli e dividili usando le stesse frazioni.»

«Ci ho pensato, Ali. Ma in quel caso il vecchio saggio dovrebbe aggiungere tre cammelli invece di uno. Manca di eleganza!»

Ali si accarezzò la barba. «Il problema, insomma, è se esistano altri numeri che consentano questa strana ripartizione di cammelli.»

«Sì. Ho in mente di assegnare a ciascuno dei miei figli una frazione del totale che consenta l'introduzione, e la successiva rimozione, esattamente di un cammello in più.»

Ali si mise più comodo e sorrise. «I numeri sono sempre stati il mio forte, Mustafa. Mi chiedo...» Rimase con gli occhi fissi nel vuoto per qualche secondo. «Per la grazia di Allah, forse un modo c'è. Ma prima dobbiamo capire bene come funziona il trucco originale.»

Mustafa si grattò la testa. «Confesso che sono seriamente in difficoltà: quel cammello in più appare e scompare come un genio da una lampada difettosa.»

«Ci dev'essere qualcosa nella scelta di quelle particolari frazioni» disse Ali. «Per esempio, se ci fossero stati 12 cammelli e i figli ne avessero ereditato metà, un terzo e un sesto, il figlio maggiore ne avrebbe avuti sei, il secondo quattro e il terzo due. Non ci sarebbe voluto alcun cammello in più... Aha! Mi sembra di intravvedere uno spiraglio: forse le tre frazioni non possono avere come somma uno, altrimenti il trucco non funzionerebbe perché tutti i cammelli verrebbero distribuiti e non ne avanzerebbe nessuno. Vediamo: qual è la somma di 1/2, 1/3 e 1/9?»

«Ah, 17/18» disse Mustafa. «Ma è naturale! I figli ereditano solo 17/18 del numero totale dei cammelli. Se il totale è 17 non possono dividere equamente il branco, ma se invece è 18, ciascun figlio ne prende una parte e avanza un cammello.» Improvvisamente gli venne un pensiero. «Quel vecchio non era poi così saggio, vero? Non ha mai fatto notare a nessuno che le frazioni non danno una somma intera.»

«È proprio in questo che sta la sua maggiore saggezza» replicò Ali. «Il trucco funziona perché la somma delle tre frazioni assegnate ai figli è una frazione in cui il denominatore supera di uno il numeratore. In questo caso il numeratore è 17 e il denominatore è 18.» Fece un largo sorriso. «Ce ne sono tante di frazioni di questo genere. Per un numero intero d qualsiasi, prendono la forma $(d-1)/d$... Ci sono! Tu hai 39 cammelli; giusto?»

«Sì.»

«Allora non hai che da scegliere frazioni che abbiano come somma 39/40» disse Ali. «Per esempio 1/2, 1/4 e 9/40.» La sua espressione di trionfo si spense rapidamente. «Non mi sembri soddisfatto, Mustafa.»

«Manca di semplicità, Ali. Ciascuna frazione dovrebbe essere uno su qualcosa: uno su tre o uno su 19; qualcosa del genere. Non nove su 40.»

«Ah, vuoi numeratori uguali a 1.»

«Proprio così.»

«Insomma, vorresti avere una soluzione con numeri interi dell'equazione $1/a+1/b+1/c=(d-1)/d$. Ciò significa che il numero $(d-1)/d$ deve essere espresso come somma di tre inversi. Gli egizi scrivevano spesso frazioni in termini di somma di inversi, quindi la somma di $1/a$, $1/b$ e $1/c$ è una frazione egizia a tre termini.»

«Ho trovato un modo per semplificare la tua equazione» disse il patriarca, e scrisse la seguente equazione:

$$1/a + 1/b + 1/c + 1/d = 1$$

Ali si diede una manata sulla coscia con entusiasmo. «Quindi se a è 2, b è 3 e c è 9, allora d deve essere 18, dato che $1/2+1/3+1/9+1/18=1$. Ora non ci rimane che trovare altre soluzioni alla tua equazione egizia a quattro termini, cioè trovare quattro numeri i cui inversi abbiano per somma 1.» Fece una pausa.

Mustafa corrugò la fronte. «Un'altra soluzione c'è di sicuro. Vale a dire, $1/4+1/4+1/4+1/4=1$. E adesso?»

«Troveremo tutte le possibili soluzioni della tua equazione.» Ali prese un foglio di carta. «È una questione delicata, perché abbiamo a che fare con quella che i matematici chiamano equazione diofantea, un'equazione che si deve risolvere usando solo numeri interi. Anzi, in questo caso, numeri interi positivi. Sono equazioni studiate da Diofanto di Alessandria nel III secolo d.C.»

Mustafa si girò penosamente nel letto per dare sollievo alle sue ossa martoriate. «Non ti sembra troppo ambizioso, Ali, cercare tutte le soluzioni? Potrebbero essercene moltissime.»

«In genere le equazioni diofantee non hanno un numero eccessivo di soluzioni» rispose Ali, «anche se ci sono delle eccezioni. E in questo caso...»

Iniziò a riempire il foglio. «Credo di poter dimostrare che esiste un numero finito di soluzioni. Inoltre la dimostrazione ci consente di trovarle tutte in modo sistematico; in mezzo ce ne sarà una che ti può andare bene. Supponiamo che i numeri siano ordinati per grandezza: $a \leq b$ e $b \leq c \leq d$. Allora a non può essere maggiore di 4. Se fosse uguale o maggiore di 5, infatti, allora b, c e d sarebbero uguali o maggiori di 5, e quindi la somma dei loro inversi non sarebbe mai uguale a 1 e sarebbe sempre uguale o minore di $1/5+1/5+1/5+1/5$, ossia 4/5.»

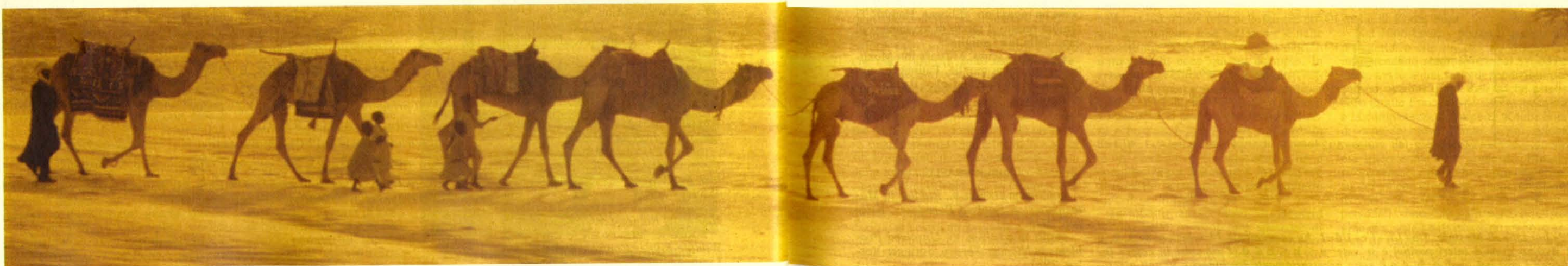
Mustafa lo fissò negli occhi. «Questo ci serve a qualcosa?»

«Certo. Vedi, sappiamo anche che tutti e quattro i numeri non possono essere inferiori a 2. In caso contrario, la somma inizierebbe con 1/1 e sarebbe sempre troppo grande. Quindi rimangono solo tre possibilità: a uguale a 2, 3 o 4. Nel primo caso, $a=2$, l'equazione diventa $1/2+1/b+1/c+1/d=1$.» Semplificò un poco questa equazione e scrisse i tre casi. Con $a=2$, la somma degli inversi di b, c e d è uguale a 1/2, ossia $1/b+1/c+1/d=1/2$. Quando $a=3$, la somma deve essere uguale a 2/3, e quando $a=4$, la somma è uguale a 3/4.

Mustafa era perplesso. «Ma, Ali, adesso hai tre equazioni invece di una.»

«Sì, Mustafa, ma con tre variabili invece di quattro! Per di più, posso ripetere lo stesso procedimento per ciascuna di esse. Prendiamo, per esempio, la prima delle tre equazioni, $1/b+1/c+1/d=1/2$. È evidente che b non deve essere maggiore di 6, altrimenti la somma sarebbe minore o uguale a $1/7+1/7+1/7$, cioè 3/7, che è minore di 1/2. Allo stesso modo, per tre inversi che abbiano come somma 2/3, b deve essere al massimo 4; e per una somma uguale a 3/4, b deve essere ancora al massimo 4. Questo significa che i tre casi che abbiamo trovato per il numero a si suddividono in un numero finito di sottocasi per b.»

«E poi» disse Mustafa con entusia-

Tre eredi devono spartirsi sette cammelli. Al primo spetta metà del branco, al secondo un quarto e al terzo un ottavo. Come possono ottenere ciascuno la propria parte senza fare a pezzi un cammello?

smo «usi di nuovo lo stesso trucco!»

«Esattamente. Come ho già detto, se $1/b+1/c+1/d=1/2$, b deve essere al massimo 6. E dato che in questo caso a è 2, b deve essere almeno 3. Supponiamo, per esempio, che sia 3. Allora $1/2+1/3+1/c+1/d=1$, cioè $1/c+1/d=1/6$.»

«E da questo» esclamò Mustafa «deduciamo che c è al massimo 12, dato che $1/13+1/13$ è uguale a $2/13$, che è minore di $1/6$.»

«Di nuovo esatto. A questo punto abbiamo un insieme finito di sottocasi per c, in ciascuno dei quali d ha un unico valore che possiamo calcolare con precisione. Per esempio, se $a=2$, $b=3$ e $c=11$, allora d deve soddisfare l'equazione $1/2+1/3+1/11+1/d=1$, il che significa che d è uguale a $66/5$. Ma dato che questo non è un numero intero, vuol dire che non esiste una soluzione con $a=2$, $b=3$ e $c=11$. Se invece abbiamo $a=2$, $b=3$ e $c=10$, allora $1/2+1/3+1/10+1/d=1$, e quindi $d=15$. In questo caso c'è una soluzione. In generale, se d risulta essere un numero intero, abbiamo una soluzione; altrimenti quel caso particolare non porta ad alcuna soluzione.»

«Inoltre lo stesso ragionamento si applica a qualsiasi equazione della forma $1/a+1/b+...+1/z=p/q$, in cui $a, b,..., z, p$ e q sono numeri interi positivi. Esiste un numero finito di modi per scrivere una qualsiasi frazione data come frazione egizia con un numero prefissato di termini e le soluzioni si possono trovare con una serie di semplici deduzioni.»

Mustafa tossì sputando sangue. «Mi sembra che tu abbia dimostrato un teorema molto generale, Ali.»

«Proprio così. Ora, lasciami qualche istante per calcolare tutte le soluzioni della tua equazione.» Ali si mise a scrivere furiosamente (*si veda la tabella in questa pagina*). «Ci sono esattamente 14 soluzioni diverse.»

«E ora abbiamo sotto gli occhi il modo per risolvere il problema della tua eredità» fece notare Ali. «La prima soluzione della mia tabella è $1/2+1/3+1/7+1/42=1$. Mustafa, se tu possedessi 41 cammelli potresti stabilire che al tuo primo figlio vada metà del branco, al secondo un terzo e al terzo un settimo. Alla tua morte, Allah non voglia, dovranno procurarsi un quarantaduesimo cammello per esaudire le tue ultime volontà, e così il tuo figlio primogenito avrà 21 cammelli, il secondo 14 e il terzo sei.»

Il patriarca agonizzante prese la mano del barbiere e la strinse forte. «Ali, hai esaudito le mie preghiere. Adesso non mi rimane che procurarmi altri due cammelli. Stendiamo subito i termini del testamento...».

Vi fu una certa agitazione all'esterno della tenda. Improvvisamente entrò di corsa un ragazzino. «Ebbene, Hamid? Ti sembra questo il modo di avvicinarti al capo della tua famiglia?»

«Ti chiedo scusa, Mustafa ibn Mokhta. La tua terza moglie, Fatima, ha appena dato alla luce un figlio! Il tuo quarto figlio!»

a	1-1/a	b	1-1/a-1/b	c	1-1/a-1/b-1/c	d
2	1/2	2	0		0	
	1/2	3	1/6	6	0	
			1/6	7	1/42	42
			1/6	8	1/24	24
			1/6	9	1/18	18
			1/6	10	1/15	15
			1/6	11	5/6	
			1/6	12	1/12	12
	1/2	4	1/4	4	0	
			1/4	5	1/20	20
			1/4	6	1/12	12
			1/4	7	3/28	
			1/4	8	1/8	8
	1/2	5	3/10	5	1/10	10
			3/10	6	2/15	
			3/10	7	11/70	
	1/2	6	1/3	6	1/6	6
3	2/3	3	1/3	3	0	
			1/3	4	1/12	12
			1/3	5	2/15	
			1/3	6	1/6	6
	2/3	4	5/12	4	1/6	6
4	3/4	4	1/2	4	1/4	4

L'equazione di Mustafa, $1/a+1/b+1/c+1/d=1$, ha esattamente 14 soluzioni se a, b, c e d sono numeri interi positivi e se vale: $a \leq b \leq c \leq d$. I riquadri in colore indicano i casi nei quali a, b, c o d sono necessariamente frazionari o uguali a zero.

BIBLIOGRAFIA

NORTHROP EUGENE P., *Riddles in Mathematics: A Book of Paradoxes*, Krieger, 1975.

CROFT H. e GUY R. K., *Unsolved Problems in Number Theory*, Springer-Verlag, 1981.

già noti a vari lettori potenziali, ma che non potevano mancare in un'opera con queste aspirazioni: il CASE è infatti un tentativo di sistematizzare e industrializzare attività in gran parte artigianali, e in queste situazioni la base metodologica risulta cruciale.

Chi decida di affrontare questa parte del volume troverà una panoramica vasta che abbraccia anche aree poco note, e discussioni chiare ed efficaci, almeno per certi argomenti chiave. Si apprezzano, per esempio, la discussione del modello entità-relazioni, fondamentale per la definizione concettuale delle strutture dei dati, la presentazione della metodologia detta «ingegneria dell'informazione», una delle più stimolanti tra quelle di successo. Riesce interessante la discussione della metodologia della «camera bianca», che si sforza di prevenire la comparsa stessa degli errori con verifiche e dimostrazioni formali anziché organizzarne la ricerca e la correzione in un collaudo a posteriori, come avviene nelle impostazioni tradizionali. Va segnalato peraltro come, soprattutto su argomenti secondari e nelle carrellate più ampie, l'esposizione si faccia a volte frettolosa e i nessi faticosi da seguire: un inconveniente spiegabile in parte con la difficoltà di conciliare completezza e concisione, e in parte col fatto, segnalato sportivamente dall'editore, che questa prima parte è una rielaborazione di più opere realizzate nel decennio precedente.

Carenze di questo tipo sono comunque pressoché assenti nella seconda sezione, dove Orlandi traccia un quadro inevitabilmente conciso, ma assai efficace, del mercato italiano del CASE. La discussione è aggiornata al 1990, un momento significativo: proprio allora i grandi attori del mondo informatico in generale, IBM e Digital Equipment, sancivano la maturità commerciale e industriale del CASE come prodotto, presentando soluzioni loro proprie e liberando l'ingegneria del software dall'alone di pionierismo che ancora l'avvolgeva. La mossa però non è riuscita a risolvere le incertezze del mercato, così che lavori come quello di Orlandi restano ancora oggi pienamente giustificati: i prodotti dei «grandi» infatti non erano ancora, né paiono oggi, in grado di scalzare quelli che vari fornitori meno autorevoli avevano realizzato con qualche anno di anticipo, conseguendo un vantaggio che ancora oggi riescono a mantenere.

Di questo mercato poliedrico il volume dà una descrizione tanto più preziosa in quanto centrata specificamente sulla situazione italiana, una caratteristica rara nella letteratura di buon livello. Significativa, e importante per la completezza della trattazione, risulta l'attenzione dedicata al problema del recupero di applicazioni già esistenti, cruciale nell'economia di un centro informatico, ma per molti aspetti meno ben serviti dai prodotti attuali di quanto non sia lo sviluppo di sistemi nuovi partendo da zero.

Libero da legami immediati con prodotti e iniziative commerciali specifiche, Orlandi può fornire suggerimenti preziosi per chi si accinga a introdurre il CASE in un'organizzazione; considerazioni trascurate a volte, e raramente in totale innocenza, da operatori più direttamente coinvolti nell'economia del settore. Ecco quindi la raccomandazione di collaudare ogni soluzione con un progetto pilota, non marginale ma neppure critico per l'organizzazione (anche se bisogna ammettere che i lavori «importanti ma non urgenti» non sono poi molto diffusi). Ecco l'invito a badare all'*iceberg* dei costi occulti, ma non per questo trascurabili, come quelli dell'addestramento e delle nuove attrezzature. La pratica dimostra che risulta particolarmente importante l'ammonimento a non sottovalutare le conseguenze organizzative: l'introduzione di tecniche CASE può stimolare, e spesso impone, una trasformazione profonda dell'organizzazione di un centro informatico, uno sconvolgimento forse necessario e probabilmente positivo, ma sicuramente assai gravoso che è bene prevedere e preparare per quanto possibile.

Nel complesso, dunque, l'opera di Eugenio Orlandi, utile in generale come introduzione all'argomento per operatori del settore e studenti, soddisfa appieno la propria aspirazione a svolgere un ruolo nella dialettica tra fornitori e acquirenti di tecnologie informatiche, prezioso strumento di difesa, ma anche, come spesso occorre, utile supporto all'attacco. (*Gianluca Marcellino*)

KOOBI FORA RESEARCH PROJECT Vol. 4: HOMINID CRANIAL REMAINS

di Bernard Wood
Oxford University Press, Oxford, 1991, pp. 492 (£. 95,00).

Chiamare belli i fossili che riempiono le pagine di questo libro può apparire eccessivo, se non altro per rispetto al senso estetico del lettore comune. Ma se c'è bellezza nei miseri resti delle nostre origini anatomiche, e se bellezza c'è nelle monografie specialistiche destinate a immortalarli, ecco qui un esempio. In antropologia come in qualsiasi altro settore della ricerca scientifica, contrariamente all'opinione di alcuni cosiddetti «umanisti», si può trovare infatti bellezza e bruttezza come in un dipinto o in un film. I criteri estetici hanno anzi molto in comune, e bastano sensibilità e competenza per distinguere, in un lavoro di scienza, la paccottiglia dall'ordinario «mestiere» e dall'«opera d'arte».

In questo atteso libro di Bernard Wood, bellezza vuol dire spessore di personale riflessione, limpidezza ed economia di linguaggio ed eleganza di scrittura. La proprietà di termini è esemplare ed è bello vedere un «arido» specialista porsi questioni di stile. Dietro la solida prosa si avverte un decennio di lavoro, da parte di un antropologo fisico (Wood è professore di anatomia all'Università di Liverpool) che ha passato questo arco di tempo meglio di tanti colleghi. Non ha scritto libri pettegoli, non ha imbastito *show* o chiassate da primadonna, non ha neppure sgomitato per essere il primo a pubblicare un fossile (o addirittura soltanto il nome di un fossile).

Piuttosto, egli ha affrontato lo studio di una delle più importanti collezioni di «primi uomini» ponendosi tre ordini di problemi: familiarizzarsi con il materiale in esame, ideare nuovi metodi per confrontare i fossili e raggiungere il miglior equilibrio possibile nel collocare il proprio lavoro all'interno della tradizione antropologica. In tutte e tre le direzioni ci sembra che il risultato sia di altissimo livello. La stessa questione del conoscere il materiale non è banale come sembra, quando la collezione comprende ben 127 reperti, fra cui otto straordinari crani quasi completi, e la descrizione stessa comporta assoluta padronanza anatomica dell'uomo moderno ed esperienza diretta di altre decine di preziosissimi esemplari sparsi nei musei dei due emisferi.

Ma dov'è Koobi Fora e di che materiale si parla? La famosa Koobi Fora è una ridicola linguetta di terra che si protende nel Lago Turkana (già Rodolfo) dalla costa del Kenya. Non lontano, all'estremità settentrionale del lago, corre il turbolento confine con l'Etiopia e sfocia il fiume Omo. Il basso Omo è un paradiso terrestre per i cercatori di faune fossili vecchie da uno a 4 o 5 milioni di anni. Negli anni sessanta vi si svolse una ambiziosa missione scientifica internazionale, americano-franco-kenyota, il cui principale obiettivo era quello di trovare fossili di primordiali ominidi. Insofferente della disciplina di gruppo, nell'estate 1967 Richard Leakey, figlio del famoso antropologo Louis, si fece condurre in elicottero a cercare fossili per conto proprio, e volando a bassa quota a est del Turkana trovò la sua terra promessa proprio alle spalle di Koobi Fora.

Nel 1968 Leakey piantò il campo sul promontorio con un piccolo gruppo di intraprendenti studiosi (fra cui Wood) e diede avvio a una serie di spedizioni del Museo nazionale del Kenya che sarebbero durate fino al 1981. Per la quantità e la completezza dei reperti, Koobi Fora divenne in breve tempo la più gelosa creatura del giovane Leakey e - anche più interessante - un nome di primaria risonanza nel mondo tutt'altro che chiuso dei paleoantropologi: scoperte e controversie lì nate, alleanze e animosità personali, sono finite più volte sulle pagine di giornali e riviste. Uno spinoso errore di datazione, in parte ispirato dal desiderio che certi crani protoumani fossero estremamente antichi, ha fatto di